



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE141599

**PERHITUNGAN CCT (*CRITICAL CLEARING TIME*)
BERDASARKAN *CRITICAL TRAJECTORY*
MENGUNAKAN HILANGNYA SINKRONISASI
PADA SISTEM MULTI MESIN DENGAN
MEMPERTIMBANGKAN KONDISI *UNBALANCE***

Ruliana Puspita Sari
NRP 2211 100 012

Dosen Pembimbing
Dr. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
Feby Agung Pamuji, ST., MT.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



FINAL PROJECT - TE141599

***CALCULATION OF CCT BASED ON CRITICAL
TRAJECTORY USING LOSS OF SYNCHRONISM IN
MULTI MACHINE SYSTEM BY CONSIDERING
UNBALANCED CONDITION***

Ruliana Puspita Sari
NRP 2211 100 012

Lecturer
Dr. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
Feby Agung Pamuji, ST., MT.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2015

**PERHITUNGAN CCT (CRITICAL CLEARING TIME)
BERDASARKAN CRITICAL TRAJECTORY MENGGUNAKAN
HILANGNYA SINKRONISASI PADA SISTEM MULTI MESIN
DENGAN MEMPERTIMBANGKAN KONDISI UNBALANCE**

TUGAS AKHIR

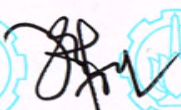
**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada**

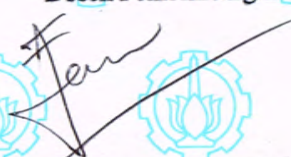
**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

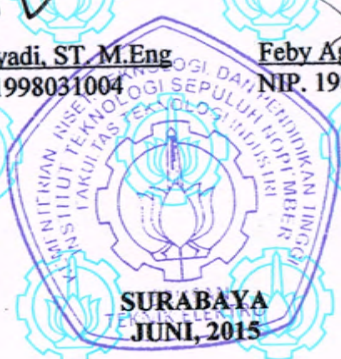
Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II


Dr. Ardyono Priyadi, ST, M.Eng
NIP. 197309271998031004


Feby Agung Pamuji, ST.,MT.
NIP. 198702062012121002


SURABAYA
JUNI, 2015

PERHITUNGAN CCT (*CRITICAL CLEARING TIME*) BERDASARKAN *CRITICAL TRAJECTORY* MENGUNAKAN HILANGNYA SINKRONISASI PADA SISTEM MULTI MESIN DENGAN MEMPERTIMBANGKAN KONDISI *UNBALANCE*

Nama : Ruliana Puspita Sari
Pembimbing I : Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST, M.Eng.
Pembimbing II : Feby Agung Pamuji ST., MT.

ABSTRAK

Perhitungan *critical clearing time* (CCT) merupakan hal yang penting karena berhubungan dengan kestabilan sistem akibat gangguan besar seperti hubung singkat. Bekerjanya pemutus daya untuk mengisolasi gangguan tidak menjamin sistem akan kembali stabil. Sistem akan kembali stabil apabila gangguan dihilangkan sebelum waktu pemutus kritisnya dan sistem tidak stabil bila gangguan dihilangkan setelah waktu pemutus kritisnya. Perhitungan CCT dengan *numerical simulation* memberikan hasil yang akurat, namun memerlukan proses iterasi yang lama dan nilai CCT yang diperoleh masih berada dalam *range* stabil dan tidak stabil. Oleh karena itu, diusulkan metode baru untuk memperoleh nilai CCT yakni dengan pendekatan *critical trajectory*. Metode ini sangat efektif karena tidak memerlukan waktu lama (*direct method*). Hampir semua gangguan hubung singkat yang terjadi pada sistem tenaga adalah gangguan asimetri. Gangguan asimetri menyebabkan arus berlebih pada fasa yang terkena gangguan sehingga menyebabkan kondisi *unbalance*. Pada tugas akhir ini perhitungan CCT dilakukan dengan metode hilangnya sinkronisasi akibat gangguan asimetri. Hasil simulasi yang dilakukan menunjukkan bahwa nilai CCT untuk tiap gangguan yang terjadi memiliki nilai hampir sama. Pada sistem 3 generator 9 bus Fouad dan Anderson tanpa *damping* nilai CCT yang diperoleh pada semua jenis gangguan sekitar 0,21-0,22 detik, sedangkan pada sistem 7 generator 57 bus IEEE tanpa *damping* nilai CCT yang diperoleh pada semua jenis gangguan sekitar 0,10-0,11 detik.

Kata kunci: Analisis kestabilan transien, *critical clearing time (cct)*, *critical trajectory*, hilangnya sinkronisasi, *unbalance fault*

Halaman ini sengaja dikosongkan

CALCULATION OF CCT BASED ON CRITICAL TRAJECTORY USING LOSS OF SYNCHRONISM IN MULTI MACHINE SYSTEM BY CONSIDERING UNBALANCED CONDITION

Name : Ruliana Puspita Sari
Advisor I : Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST, M.Eng.
Advisor II : Feby Agung Pamuji ST., MT.

ABSTRACT

Calculation of critical clearing time (CCT) is important because it relates to the stability of system as a result of major disturbances such as short circuit. Breaker operation to remove disturbance does not guarantee the system stability. If disturbance is eliminated before critical clearing time, the system will return to stable state. Conversely, if the disturbance is eliminated after critical time, the system becomes unstable. CCT obtained by numerical simulation calculations provide accurate results, but require a long process of iteration and CCT obtained are still in the range of stable and unstable. Therefore, new method proposed to obtain CCT by approach of critical trajectory. This method is very effective because it does not require a long time (direct method). Almost all short circuit occurred in power system is asymmetry fault. Asymmetry fault causes excessive current in phase fault that causes an unbalanced condition. In this final project calculation of CCT use loss of synchronism method by considering the condition of unbalance caused by asymmetry fault. The simulation results show CCT for each fault occurred approximately has same value. CCT obtained in 3 generators 9 buses Fouad and Anderson system without damping on each fault type is about 0,21-0,22 second, while in 7 generators and 57 buses system without damping on each fault type is about 0,10-0,11 second.

Keywords : *Transient stability analysis, critical clearing time (cct), critical trajectory, loss of synchronism, unbalance fault.*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Robbil 'Alamin puji syukur dipanjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat dan karunia yang telah dilimpahkan kepada penulis sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan. Tugas akhir ini merupakan salah satu persyaratan dalam menyelesaikan studi pada Jurusan Teknik Elektro ITS. Terelesainya tugas akhir ini tidak lepas dari bantuan dan dukungan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan banyak terima kasih, antara lain kepada:

1. Bapak Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng. selaku dosen pembimbing I yang telah banyak memberikan bimbingan dan pengarahan pada penulis mulai dari pemilihan judul, penyusunan proposal hingga penyelesaian tugas akhir ini.
2. Bapak Feby Agung Pamuji ST., MT. selaku pembimbing II yang telah memberikan bimbingan dan pengarahan kepada penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Seluruh dosen Jurusan Teknik Elektro ITS yang telah memberikan bimbingan dan ilmu pengetahuan selama perkuliahan.
4. Orang tua dan adik penulis yang senantiasa mendoakan, memotivasi dan mendukung tanpa henti bagi yang terbaik dan demi kesuksesan penulis selama ini.
5. Rekan-rekan Laboratorium Instrumentasi Pengukuran Identifikasi Sistem Tenaga yang mewarnai keseharian penulis dengan penuh canda tawa dan senantiasa ada saat suka duka: Elysa, Esi, Nurul, Maya, Feisal, Galuh, Slamet, Wahyu, Surip, Evandro, Arief BHS, Mas Isa, Mas Iska, Mas Wahyu, Mas Dimok, Raki, Yudies, Iqbal, Viko, bapak ibu S3.
6. Rekan-rekan kontrakan TMU-17 atas kebersamaan, kekeluargaan dan kenangan tak terlupakan selama perkuliahan: Nurul, Mufi, Septy, Sasa, Riza, Nurin.
7. Rekan-rekan e-51 yang sudah merupakan keluarga bagi penulis.
8. Semua pihak yang telah membantu pelaksanaan tugas akhir.

Penulisan tugas akhir ini tidak lepas dari kesalahan. Oleh karena itu, kritik dan saran selalu terbuka demi perbaikan ke depannya.

Surabaya, 27 Mei 2015

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

Halaman

JUDUL	
LEMBAR PERNYATAAN	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xxi
DAFTAR SIMBOL	xxiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar belakang masalah	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Metodologi	2
1.5 Sistematika	3
1.6 Relevansi atau manfaat	4
BAB 2 KESTABILAN TRANSIEN	5
2.1 Kestabilan dalam Sistem Tenaga	5
2.1.1 Kestabilan Transient	6
2.2 Persamaan Ayunan	7
2.3 Lintasan Kritis (<i>Critical Trajectory</i>)	8
2.4 Jenis-Jenis Gangguan	9
2.4.1 Gangguan Simetri	10
2.4.2 Gangguan Asimetri (<i>Unbalance Fault</i>)	11
2.5 Kumparan Peredam (<i>Damper Winding</i>)	15
BAB 3 PERHITUNGAN CCT	17
3.1 Aliran Daya	17
3.2 Reduksi Matriks	18
3.3 Pemodelan Sistem Tenaga	20
3.4 Perumusan Masalah	24
3.4.1 Metode Rungekutta Orde 4	25
3.4.2 Modifikasi Persamaan Trapezoidal	25

3.4.3 Kondisi Kritis Sinkronisasi.....	27
3.4.4 Metode Newton Raphson.....	27
3.4.5 Matriks Jacobian <i>Losing Synchronism</i>	28
3.4.6 <i>Critical Trajectory</i> Metode Hilangnya Sinkronisasi.....	32
BAB 4 HASIL SIMULASI DAN ANALISIS.....	33
4.1 Perhitungan CCT Sistem 3 Generator 9 Bus Anderson dan Fouad..	33
4.1.1 Parameter Awal dan Tahapan Perhitungan CCT.....	34
4.1.2 Perhitungan CCT Sistem 3 Generator 9 Bus Tanpa <i>Damping</i>	37
4.1.3 Perhitungan CCT Sistem 3 Generator 9 Bus Menggunakan <i>Damping</i>	59
4.2 Perhitungan CCT Sistem 7 Generator 57 Bus IEEE.....	80
4.2.1 Parameter Awal dan Tahapan Perhitungan CCT.....	81
4.2.2 Perhitungan CCT Sistem 7 Generator 57 Bus Tanpa <i>Damping</i>	89
4.2.3 Perhitungan CCT Sistem 7 Generator 57 Bus Menggunakan <i>Damping</i>	111
BAB 5 PENUTUP.....	133
5.1 Kesimpulan.....	133
5.2 Saran.....	134
DAFTAR PUSTAKA.....	135
BIODATA PENULIS.....	137

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 4.1	Data Impedansi Saluran Urutan Positif dan Negatif Sistem 3 Generator 9 Bus Fouad dan Anderson.....35
Tabel 4.2	Data Impedansi Saluran Urutan Nol Sistem 3 Generator 9 Bus Fouad dan Anderson.....35
Tabel 4.3	Data Pembangkit dan Beban Sistem 3 Generator 9 Bus Fouad dan Anderson.....36
Tabel 4.4	Hasil iterasi aliran daya untuk generator.....36
Tabel 4.5	Hasil perhitungan nilai CCT sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> untuk gangguan 1 fasa ke tanah.....38
Tabel 4.6	Hasil perhitungan nilai CCT sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> untuk gangguan 2 fasa ke tanah.....44
Tabel 4.7	Hasil perhitungan nilai CCT sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> untuk gangguan 3 fasa ke tanah.....49
Tabel 4.8	Hasil perhitungan nilai CCT sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> untuk gangguan <i>line to line</i>54
Tabel 4.9	Hasil perhitungan nilai CCT sistem 3 generator 9 bus menggunakan <i>damping</i> untuk gangguan 1 fasa ke tanah.....59
Tabel 4.10	Hasil perhitungan nilai CCT sistem 3 generator 9 bus menggunakan <i>damping</i> untuk gangguan 2 fasa ke tanah.....65
Tabel 4.11	Hasil perhitungan nilai CCT sistem 3 generator 9 bus menggunakan <i>damping</i> untuk gangguan 3 fasa ke tanah.....70
Tabel 4.12	Hasil perhitungan nilai CCT sistem 3 generator 9 bus menggunakan <i>damping</i> untuk gangguan antar fasa (<i>line to line</i>).....75
Tabel 4.13	Data Impedansi Saluran Urutan Positif dan Negatif Sistem 7 Generator 57 Bus IEEE.....82
Tabel 4.14	Data Impedansi Saluran Urutan Nol Sistem 7 Generator 57 Bus IEEE.....85
Tabel 4.15	Data Pembangkit dan Beban Sistem 7 Generator 57 Bus IEEE.....87
Tabel 4.16	Hasil Iterasi Aliran Daya untuk Sistem 7 Generator 57 Bus IEEE.....88

Tabel 4.17	Hasil perhitungan nilai CCT sistem 7 generator 57 bus tanpa <i>damping</i> untuk gangguan 1 fasa ke tanah.....	89
Tabel 4.18	Hasil perhitungan nilai CCT sistem 7 generator 57 bus tanpa <i>damping</i> untuk gangguan 2 fasa ke tanah.....	95
Tabel 4.19	Hasil perhitungan nilai CCT sistem 7 generator 57 bus tanpa <i>damping</i> untuk gangguan 3 fasa ke tanah.....	101
Tabel 4.20	Hasil perhitungan nilai CCT sistem 5 generator 57 bus tanpa <i>damping</i> untuk gangguan <i>line to line</i>	106
Tabel 4.21	Hasil perhitungan nilai CCT sistem 7 generator 57 bus menggunakan <i>damping</i> untuk gangguan 1 fasa ke tanah.....	111
Tabel 4.22	Hasil perhitungan nilai CCT sistem 7 generator 57 bus menggunakan <i>damping</i> untuk gangguan 2 fasa ke tanah.....	117
Tabel 4.23	Hasil perhitungan nilai CCT sistem 7 generator 57 bus menggunakan <i>damping</i> untuk gangguan 3 fasa ke tanah.....	122
Tabel 4.24	Hasil perhitungan nilai CCT sistem 7 generator 57 bus menggunakan <i>damping</i> untuk gangguan antar fasa (<i>line to line</i>).....	127

DAFTAR SIMBOL

θ_m	: sudut mekanis rotor (radian)
T_a	: torsi percepatan (N.m)
ω_s	: kecepatan sinkron mesin (rad mech/s)
t	: waktu (detik)
δ_m	: pergeseran sudut rotor (radian)
ω_m	: kecepatan sudut rotor (rad/s)
T_D/D	: koefisien <i>damping</i>
T_e	: torsi elektromagnetis
T_m	: torsi mekanis
T_a	: torsi percepatan
M	: konstanta kelembaman (<i>inertia constant</i>)
Z	: impedansi
V	: tegangan bus
Y	: Admitansi saluran
P	: daya aktif
Q	: daya reaktif
I	: arus
I_f	: arus gangguan
V_f	: tegangan gangguan
V_{a0}	: tegangan urutan nol fasa a
V_{a1}	: tegangan urutan positif fasa a
V_{a2}	: tegangan urutan negatif fasa a
E_a/E	: tegangan generator
Z_0	: impedansi urutan nol
Z_1	: impedansi urutan positif
Z_2	: impedansi urutan negatif
I_{a0}	: arus urutan nol fasa a
I_{a1}	: arus urutan positif fasa a
I_{a2}	: arus urutan negatif fasa a
P_{spec}	: nilai daya yang ditetapkan (<i>specified</i>)
P_{calc}	: nilai daya hasil perhitungan (<i>calculated</i>)
X_d	: reaktansi generator
X_l	: reaktansi saluran transmisi
V_t	: tegangan terminal generator
ω	: kecepatan sudut rotor generator
P_m	: daya mekanis generator

P_e	: daya listrik generator
ω_s	: kecepatan sinkron generator
Y_{ij}	: admitansi saluran antara bus i dan j
G	: konduktansi saluran
B	: suseptansi saluran
ε	: epsilon (jarak antar titik pada persamaan trapezoidal)
x^k	: titik-titik pada persamaan trapezoidal
x^0	: <i>initial point</i>
x^{tu}	: <i>critical point</i>
v	: <i>eigenvector</i>
NODE	: <i>Number of Ordinary Differential Equation</i>
NG	: <i>Number Generator</i>
A	: Xd' Generator Model (pada matriks Jacobian)
W	: matriks pembobot
m	: banyaknya integrasi
k_s	: besaran skalar
J	: matriks Jacobian

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1	Trajektori generator yang terhubung ke bus <i>infinite</i> tanpa damping [4].....9
Gambar 2.2	Gangguan 3 fasa ke tanah.....10
Gambar 2.3	Gangguan 1 fasa ke tanah.....12
Gambar 2.4	Gangguan 2 fasa ke tanah.....13
Gambar 2.5	Gangguan Antar Fasa Langsung.....15
Gambar 2.6	Rotor Dua Kutub Menonjol dengan <i>Damper Winding</i> [7].....16
Gambar 3.1	Rangkaian ekuivalen sebelum gangguan.....20
Gambar 3.2	Rangkaian ekuivalen setelah gangguan.....21
Gambar 3.3	Modifikasi Trapezoidal.....26
Gambar 3.4	Matriks Jacobian Hilangnya Sinkronisasi.....31
Gambar 3.5	Konfigurasi Matriks Jacobian untuk Pemodelan Generator Tanpa Kontroler.....31
Gambar 4.1	Sistem 3 Generator 9 Bus Anderson dan Fouad.....34
Gambar 4.2	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan D....40
Gambar 4.3	Grafik sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> terhadap waktu (<i>t</i>) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan D.....41
Gambar 4.4	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap waktu (<i>t</i>) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan D.....41
Gambar 4.5	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan H....42
Gambar 4.6	Grafik sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> terhadap waktu (<i>t</i>) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan H.....43

Gambar 4.7	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan H.....43
Gambar 4.8	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan D....45
Gambar 4.9	Grafik sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan D.....46
Gambar 4.10	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan D.....46
Gambar 4.11	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan H...47
Gambar 4.12	Grafik sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan H.....48
Gambar 4.13	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan H.....48
Gambar 4.14	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan D...50
Gambar 4.15	Grafik sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan D.....51
Gambar 4.16	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus

	tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan D.....	51
Gambar 4.17	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan H...	52
Gambar 4.18	Grafik sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan H.....	53
Gambar 4.19	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan H.....	53
Gambar 4.20	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan fasa ke fasa pada titik gangguan D.....	55
Gambar 4.21	Grafik sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan fasa ke fasa pada titik gangguan D.....	56
Gambar 4.22	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan fasa ke fasa pada titik gangguan D.....	56
Gambar 4.23	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan fasa ke fasa pada titik gangguan H.....	57
Gambar 4.24	Grafik sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan fasa ke fasa pada titik gangguan H.....	58
Gambar 4.25	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan fasa ke fasa pada titik gangguan H.....	58

Gambar 4.26	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan C.....61
Gambar 4.27	Grafik sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan D.....62
Gambar 4.28	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan D.....62
Gambar 4.29	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan F.....63
Gambar 4.30	Grafik sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan F.....64
Gambar 4.31	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan F.....64
Gambar 4.32	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan D.....66
Gambar 4.33	Grafik sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan D.....67
Gambar 4.34	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan D.....67

Gambar 4.35	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan F.....68
Gambar 4.36	Grafik sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan F.....69
Gambar 4.37	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan F.....69
Gambar 4.38	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan D.....71
Gambar 4.39	Grafik sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan D.....72
Gambar 4.40	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan D.....72
Gambar 4.41	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan F.....73
Gambar 4.42	Grafik sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan F.....74
Gambar 4.43	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan F.....74

Gambar 4.44	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan D.....76
Gambar 4.45	Grafik sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan D.....77
Gambar 4.46	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan D.....77
Gambar 4.47	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan F.....78
Gambar 4.48	Grafik sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan F.....79
Gambar 4.49	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan F.....79
Gambar 4.50	Sistem 7 generator 57 bus IEEE.....81
Gambar 4.51	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> pada sistem 7 generator 57 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan B.....91
Gambar 4.52	Grafik sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan B.....92
Gambar 4.53	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan B.....92

Gambar 4.54	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> pada sistem 7 generator 57 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan C.....93
Gambar 4.55	Grafik sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan C.....94
Gambar 4.56	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan C.....94
Gambar 4.57	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> pada sistem 7 generator 57 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan B.....97
Gambar 4.58	Grafik sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan B.....98
Gambar 4.59	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan B.....98
Gambar 4.60	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> pada sistem 7 generator 57 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan C....99
Gambar 4.61	Grafik sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan C.....100
Gambar 4.62	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan C.....100
Gambar 4.63	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> pada sistem

	7 generator 57 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan B...	102
Gambar 4.64	Grafik sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan B.....	103
Gambar 4.65	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan B.....	103
Gambar 4.66	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> pada sistem 7 generator 57 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan C...	104
Gambar 4.67	Grafik sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan C.....	105
Gambar 4.68	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan C.....	105
Gambar 4.69	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> pada sistem 7 generator 57 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan fasa ke fasa pada titik gangguan B.....	107
Gambar 4.70	Grafik sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan fasa ke fasa pada titik gangguan B.....	108
Gambar 4.71	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan fasa ke fasa pada titik gangguan B.....	108
Gambar 4.72	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> pada sistem 7 generator 57 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan fasa ke fasa pada titik gangguan C.....	109

Gambar 4.73	Grafik sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan fasa ke fasa pada titik gangguan C.....	110
Gambar 4.74	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan fasa ke fasa pada titik gangguan C.....	110
Gambar 4.75	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan A.....	113
Gambar 4.76	Grafik sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan A.....	114
Gambar 4.77	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan A.....	114
Gambar 4.78	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan M.....	115
Gambar 4.79	Grafik sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan M.....	116
Gambar 4.80	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan M.....	116
Gambar 4.81	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan A.....	118

Gambar 4.82	Grafik sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan A.....	119
Gambar 4.83	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan A.....	119
Gambar 4.84	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan M.....	120
Gambar 4.85	Grafik sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan M.....	121
Gambar 4.86	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan M.....	121
Gambar 4.87	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan A.....	123
Gambar 4.88	Grafik sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan A.....	124
Gambar 4.89	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan A.....	124
Gambar 4.90	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan M.....	125

Gambar 4.91	Grafik sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan M.....	126
Gambar 4.92	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan M.....	126
Gambar 4.93	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan fasa ke fasa pada titik gangguan A.....	128
Gambar 4.94	Grafik sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan fasa ke fasa pada titik gangguan A.....	129
Gambar 4.95	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan fasa ke fasa pada titik gangguan A.....	129
Gambar 4.96	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan fasa ke fasa pada titik gangguan M.....	130
Gambar 4.97	Grafik sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan fasa ke fasa pada titik gangguan M.....	131
Gambar 4.98	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan <i>damping</i> bila mengalami gangguan fasa ke fasa pada titik gangguan M.....	131

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Ruliana Puspita Sari, dilahirkan di kota Ponorogo, Jawa Timur pada 10 Juli 1993. Penulis adalah putri dari pasangan Sugeng Waluyo dan Suci Hidayati. Memulai jenjang pendidikan di TK Muslimat NU Ponorogo, kemudian melanjutkan pendidikan formal di SD Ma'arif NU Ponorogo, SMPN 1 Ponorogo dan SMAN 1 Ponorogo hingga lulus tahun 2011. Kemudian melanjutkan pendidikan jenjang perguruan tinggi di Teknik Elektro ITS Surabaya. Penulis aktif di Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro periode kepengurusan 2012/2013. Selain itu juga aktif di Divisi Workshop Teknik Elektro 2013/2014. Dalam hal akademik penulis aktif sebagai asisten di Laboratorium Instrumentasi Pengukuran dan Identifikasi Sistem Tenaga. Penulis dapat dihubungi melalui email ruliana.puspitasari@gmail.com

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang masalah

Kestabilan sistem tenaga menjadi salah satu hal paling penting dalam operasi sistem. Hal ini dikarenakan ketidakstabilan sistem telah menjadi penyebab utama *blackout* pada sistem tenaga. Kestabilan sistem tenaga merupakan kemampuan sistem tenaga listrik, pada kondisi operasi awal, untuk kembali ke kondisi operasi normal setelah mengalami gangguan. Fokus utama industri-industri terkait kestabilan sistem adalah dalam hal analisa kestabilan transien.

Kestabilan transien adalah kemampuan mesin-mesin sinkron yang saling terinterkoneksi untuk mempertahankan sinkronisasi saat terkena gangguan transien. Respon sistem akibat gangguan transien melibatkan pergeseran sudut rotor generator yang besar. Pada sistem yang saling interkoneksi, frekuensi sistem dan kecepatan putar rotor pada mesin sinkron adalah sama. Adanya gangguan akan menyebabkan pergeseran sudut rotor dimana besarnya pergeseran sudut rotor tergantung dari besarnya gangguan yang terjadi. Kestabilan tergantung pada kondisi awal sistem dan tingkat keparahan gangguan. Gangguan yang cukup parah mengakibatkan kondisi steady state sesudah gangguan berbeda dengan sebelum gangguan.

Analisa kestabilan transien pada sistem tenaga umumnya hanya menganalisa dengan mempertimbangkan gangguan simetris pada sistem seimbang. Sementara ketidakseimbangan sistem yang disebabkan oleh gangguan tidak simetri hanya mendapatkan perhatian yang relatif sedikit. Gangguan tidak simetris pada sistem seimbang dapat mengakibatkan ketidakseimbangan (*unbalance*) pada sistem. Oleh karena itu, pada tugas akhir ini gangguan yang digunakan dalam perhitungan CCT meliputi gangguan simetri dan asimetri, antara lain gangguan satu fasa ke tanah, gangguan dua fasa ke tanah, gangguan tiga fasa ke tanah serta gangguan antar fasa.

Gangguan pada sistem tenaga listrik mengakibatkan bekerjanya *circuit breaker (CB)* untuk mengisolasi daerah yang terkena gangguan. Bekerjanya CB harus kurang dari waktu pemutus kritis (*critical clearing time*). Hal ini dikarenakan pemutusan yang dilakukan CB berpengaruh pada kondisi kestabilan sistem. Jika

gangguan diputus kurang dari waktu kritisnya (CCT) maka sistem akan kembali stabil. Sebaliknya, jika gangguan diputus lebih dari waktu kritisnya (CCT) maka sistem akan berada pada kondisi tidak stabil.

Analisa kestabilan biasanya dilakukan dengan *numerical simulations*, dimana integrasi numerik dilakukan *step by step* dari *initial value* sampai diperoleh respon dinamis terhadap gangguan. Metode ini efektif dan sangat berguna namun memakan waktu yang lama sehingga tidak sesuai digunakan secara *real time*. Metode baru yang lebih cepat dan efisien adalah dengan menghitung *critical trajectory* yang merepresentasikan kondisi kritis untuk kestabilan. Salah satu metode untuk memperoleh *critical trajectory* adalah dengan menggunakan hilangnya sinkronisasi pada sistem multi mesin. Oleh karena itu pada tugas akhir ini akan dilakukan perhitungan nilai CCT berdasarkan *critical trajectory* dengan menggunakan hilangnya sinkronisasi pada sistem multimesin dengan mempertimbangkan kondisi *unbalance*.

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan utama yang akan dibahas dalam tugas akhir ini adalah menghitung nilai CCT berdasarkan *critical trajectory* dengan menggunakan hilangnya sinkronisasi dengan mempertimbangkan kondisi *unbalance* khususnya pada sistem 3 generator 9 bus dan sistem 7 generator 57 bus. Gangguan yang digunakan dalam perhitungan CCT adalah gangguan satu fasa ke tanah, gangguan dua fasa ke tanah, gangguan tiga fasa ke tanah serta gangguan antar fasa.

1.3 Tujuan

Tugas akhir ini bertujuan untuk mendapatkan nilai CCT berdasarkan *critical trajectory* dengan menggunakan hilangnya sinkronisasi dengan mempertimbangkan kondisi *unbalance* yang diakibatkan oleh gangguan tidak simetri pada sistem tenaga.

1.4 Metodologi

1. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk mencari referensi melalui buku, jurnal ilmiah (*paper*), dan *browsing* melalui internet yang berhubungan dengan judul tugas akhir ini.

2. Perancangan Formulasi dan Pembuatan Program
Berdasarkan formulasi dan matematis dari teori yang ada, dibuatlah rancangan program dengan matlab.
3. Simulasi
Simulasi dilakukan untuk mendapatkan nilai *CCT* pada beberapa kali iterasi, grafik karakteristik kecepatan sudut dan karakteristik sudut rotor dari sistem.
4. Analisa data
Dari simulasi yang dilakukan didapatkan parameter *CCT* (*critical clearing time*) pada stabilitas transien. Parameter inilah yang akan dianalisis sehingga didapatkan permodelan yang paling baik.
5. Kesimpulan
Kesimpulan yang diambil yaitu berdasarkan dari hasil analisis atas simulasi yang telah dilakukan serta akan diberikan saran berkaitan dengan penelitian yang telah dilakukan.

1.5 Sistematika

Sistematika penulisan Tugas Akhir ini akan dijelaskan sebagai berikut:

Bab I : Pendahuluan

Bab ini membahas penjelasan mengenai latar belakang, permasalahan, tujuan, metodologi, sistematika penulisan dan relevansi atau manfaat.

Bab II : Kestabilan Transien

Bab ini membahas mengenai analisis aliran daya, stabilitas pada sistem tenaga termasuk kestabilan transien, gangguan *unbalance*, serta mengenai waktu pemutus kritis dan trajektori kritis.

Bab III : Perhitungan CCT

Pada bab ini dibahas mengenai pemodelan sistem, dan persamaan-persamaan yang digunakan dalam permodelan sistem. Bab ini terutama membahas mengenai alur untuk menentukan waktu pemutus kritis.

Bab IV : Hasil Simulasi dan Analisis

Bab ini membahas tentang hasil simulasi serta analisis dari hasil simulasi tersebut. Data yang akan dianalisis adalah parameter-parameter CCT yang diperoleh dari beberapa titik gangguan berdasarkan analisis kestabilan transien.

Bab V : Penutup

Pada bab ini membahas kesimpulan yang diperoleh dari keseluruhan permasalahan dan analisa yang telah dilakukan. Selain itu, bab ini juga akan membahas saran sebagai masukan untuk penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan tugas akhir ini.

1.6 Relevansi atau manfaat

Hasil yang diperoleh dari Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai kestabilan transien dengan menggunakan gangguan asimetri dan dapat digunakan sebagai referensi bagi penelitian selanjutnya, terutama mengenai perhitungan *critical clearing time* menggunakan metode trajektori kritis.

BAB 2

KESTABILAN TRANSIEN

2.1 Kestabilan dalam Sistem Tenaga

Definisi kestabilan sistem tenaga merupakan kemampuan sistem tenaga listrik, pada suatu kondisi operasi awal, untuk kembali ke kondisi operasi *equilibrium* setelah mengalami gangguan. Ketidakstabilan pada sistem tenaga pada intinya merupakan kemampuan menjaga keseimbangan daya listrik. Suatu sistem tenaga yang beroperasi dalam keadaan stabil memiliki daya input mekanis *prime mover* dan daya output listrik yang seimbang. Dalam keadaan ini semua generator pada sistem berputar dalam kecepatan sinkron.

Gangguan pada sistem tenaga akan menyebabkan terjadinya perbedaan yang besar antara daya input mekanis dan daya output listrik generator. Kelebihan daya mekanis terhadap daya listrik akan mengakibatkan percepatan pada putaran rotor generator dan sebaliknya. Percepatan atau perlambatan pada generator akan mengakibatkan pergeseran sudut rotor dan generator akan mencari kondisi setimbang yang baru. Apabila gangguan tidak dihilangkan dengan segera akan menyebabkan pergeseran sudut rotor yang makin besar sehingga mengakibatkan ketidakstabilan dan berakhir pada hilangnya sinkronisasi dalam sistem. Saat mesin sinkron kehilangan sinkronisasinya, rotor akan berputar lebih cepat atau lebih lambat dibandingkan yang dibutuhkan untuk menghasilkan tegangan sesuai frekuensi sistem. Perbedaan antara frekuensi sistem dan rotor akan mengakibatkan fluktuasi yang besar pada daya output, arus, tegangan sehingga sistem proteksi akan bekerja untuk mengisolasi mesin yang tidak stabil ini.

Gangguan pada sistem tenaga yang berpengaruh pada stabilitas sistem tenaga dibagi menjadi gangguan kecil dan gangguan besar. Stabilitas sistem tenaga berdasarkan jenis gangguan tersebut dibedakan menjadi stabilitas *steady state* dan stabilitas transien. Stabilitas *steady state* merupakan kemampuan sistem tenaga mempertahankan sinkronisasi antara mesin-mesin dalam sistem setelah mengalami gangguan kecil seperti fluktuasi beban. Sedangkan stabilitas transien merupakan kemampuan sistem tenaga mempertahankan sinkronisasi setelah mengalami gangguan besar seperti hubung singkat, pelepasan beban secara mendadak dan lain sebagainya.

2.1.1 Kestabilan Transient

Kestabilan transient merupakan kemampuan sistem tenaga dalam mempertahankan sinkronisasinya setelah mengalami gangguan besar yang bersifat mendadak seperti hubung singkat atau pelepasan beban yang cukup besar selama sekitar satu ayunan. Asumsi kestabilan transient adalah bahwa pengatur tegangan otomatis (AVR) dan *governor* belum bekerja.

Kestabilan transient melibatkan adanya pergeseran sudut rotor generator sehingga kestabilan transient termasuk dalam kestabilan sudut rotor. Dalam analisa kestabilan transient sistem tenaga, hubungan antara daya dan sudut rotor menjadi hal yang sangat penting. Daya yang mengalir dari generator ke motor merupakan fungsi sudut (δ) antara rotor dari kedua mesin. Perbedaan sudut diakibatkan oleh sudut internal generator, sudut internal motor, dan perbedaan sudut antara tegangan terminal generator dan motor. Dimana semakin besar sudut rotor, daya yang disalurkan semakin meningkat hingga maksimum saat sudut 90° .

Kestabilan tergantung pada kondisi operasi awal dan tingkat keparahan gangguan. Sebelum terjadi gangguan, mesin sinkron beroperasi pada daya mekanis sesuai dengan ratingnya. Namun apabila terjadi gangguan maka daya output generator akan turun. Perbedaan besar daya output dengan daya mekanis generator menyebabkan putaran rotor generator mengalami percepatan. Percepatan yang terjadi ini mengakibatkan sudut rotor generator mengalami pergeseran menjadi lebih besar. Dengan demikian setelah gangguan dihilangkan, daya output generator menjadi lebih besar dari rating daya mekanis generator. Oleh karena itu rotor generator mengalami perlambatan yang menyebabkan sudut rotor generator mengalami pergeseran menjadi lebih kecil. Hal ini terjadi terus menerus sehingga rotor generator berosilasi hingga dicapai kondisi stabil. Sedangkan kondisi tidak stabil terjadi apabila rotor generator terus mengalami percepatan hingga pergeseran sudut rotor terus mengalami peningkatan secara tetap dan berakhir pada generator hilang sinkronisasi.

Sistem stabil tidak selalu langsung ditunjukkan dengan ketidakstabilan pada ayunan pertama. Pada kasus tertentu pada ayunan pertama sistem stabil namun semakin tidak stabil seiring osilasi berlanjut mendekati titik akhir yang dikenal dengan *multiswing instability*. Oleh karena itu pengamatan osilasi sudut rotor generator seharusnya tidak dilakukan pada ayunan pertama sudut rotor saja untuk mengantisipasi terjadinya *multiswing instability* tersebut.

2.2 Persamaan Ayunan

Persamaan ayunan berhubungan dengan pergerakan rotor terkait dengan torsi inersia sebagai resultan dari torsi mekanis dan elektrik rotor. Pada mesin sinkron, *prime mover* menghasilkan torsi mekanis (T_m) pada rotor mesin menghasilkan torsi elektromagnetis (T_e). Gangguan mengakibatkan perbedaan antara torsi mekanis dan torsi elektrik. Perbedaan torsi ini menyebabkan percepatan atau perlambatan pada rotor generator.

$$J\ddot{\theta}_m = T_a = T_m - T_e \quad (2.1)$$

Dimana

J : momen inersia semua benda yang terpasang di rotor (kg.m^2)

θ_m : sudut mekanis rotor (radian)

T_a : torsi percepatan (N.m)

Torsi mekanis dan torsi elektrik dianggap positif untuk generator sinkron. Hal ini berarti bahwa T_m adalah torsi yang mempercepat putaran rotor sehingga rotor memiliki torsi kecepatan sebesar T_a .

θ_m diukur terhadap sumbu tetap pada stator, sehingga θ_m akan terus bertambah seiring waktu. Oleh karena itu, sudut referensi dipilih relatif terhadap putaran sinkron dengan kecepatan sudut sinkron ω_s

$$\theta_m = \omega_s t + \delta_m \quad (2.2)$$

Dimana

ω_s : kecepatan sinkron mesin (rad mech/s)

t : waktu (detik)

δ_m : pergeseran sudut rotor (radian)

Dengan menurunkan persamaan (2.2) terhadap waktu diperoleh:

$$\dot{\theta}_m = \omega_s + \dot{\delta}_m \quad (2.3)$$

$$\ddot{\theta}_m = \ddot{\delta}_m \quad (2.4)$$

Persamaan (2.3) menunjukkan bahwa kecepatan sudut $d\theta_m/dt$ rotor sama dengan kecepatan sinkron hanya jika $d\delta_m/dt$ sama dengan nol. Oleh karena itu $d\delta_m/dt$ adalah penyimpangan kecepatan rotor dari kondisi sinkron dalam radian mekanis per detik.

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.4) ke dalam persamaan (2.1) maka $\ddot{\theta}$ dapat diganti dengan $\ddot{\delta}$ sehingga diperoleh persamaan di bawah ini. Persamaan (2.3) untuk sistem tanpa peredam (*dampless winding*) dan persamaan (2.4) untuk sistem dengan *dampless winding*.

$$J\ddot{\delta}_m = Ta = Tm - Te \quad (2.5)$$

$$J\ddot{\delta} = Tm - T_D \cdot \dot{\delta} - Te \quad (2.6)$$

Dimana:

ω_m : kecepatan sudut rotor (rad/s)

T_D : koefisien *damper winding*

Hasil perkalian antara torsi (T) dan kecepatan sudut (ω) adalah daya dalam watt. Oleh karena itu dengan mengalikan persamaan (2.3) dengan ω diperoleh persamaan :

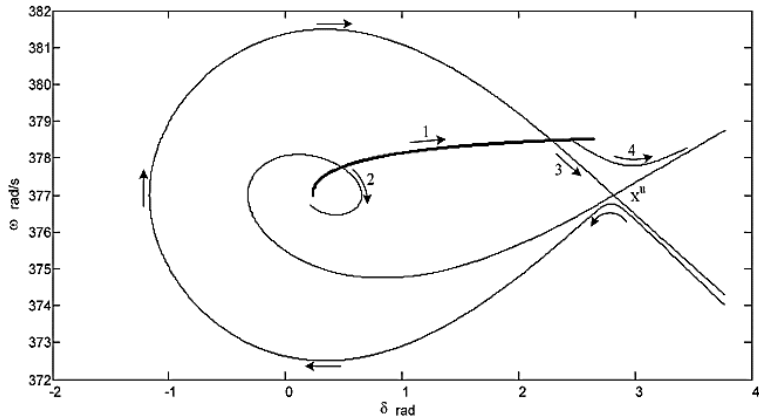
$$J\omega_m\ddot{\delta}_m = J\omega_m\dot{\omega}_m = P_m - P_e \quad (2.7)$$

$J\omega_m$ merupakan momen sudut rotor. Pada kecepatan sinkron momen ini dinyatakan dengan M dan disebut konstanta kelembaman (*inertia constant*) dari mesin tersebut. Persamaan (2.7) merupakan persamaan dasar yang mengatur dinamika (gerak) perputaran mesin sinkron dalam studi kestabilan, atau yang disebut sebagai *swing equation*.

2.3 Lintasan Kritis (*Critical Trajectory*)

Pada Gambar 2.1 yang diperoleh berdasarkan referensi [4] dapat dilihat ada empat lintasan yakni lintasan gangguan (*fault on trajectory*), lintasan kritis (*critical trajectory*), lintasan saat sistem stabil dan lintasan saat sistem tidak stabil. Lintasan gangguan ditunjukkan dengan nomor 1. Lintasan gangguan ini dimulainya tiga lintasan yang lain yakni lintasan saat sistem stabil yang ditunjukkan nomor 2, lintasan sistem tidak stabil yang ditunjukkan nomor 4 serta lintasan kritis yang ditunjukkan nomor 3.

Lintasan stabil adalah saat gangguan dihilangkan cukup cepat sehingga sistem beresiliasi pada SEP (*Stable Equilibrium Point*). Sedangkan lintasan saat sistem tidak stabil adalah saat gangguan dihilangkan terlalu lama. Lintasan kritis dimulai dari lintasan gangguan dan berakhir pada titik kritis seperti UEP (*Unstable Equilibrium Point*). Lintasan ini merupakan lintasan yang menggambarkan kondisi kritis kestabilan.



- | | |
|--|--|
| 1 : Lintasan gangguan | 4 : Kondisi tidak stabil |
| 2 : Kondisi stabil setelah gangguan hilang | X^u : Unstable Equilibrium Point (UEP) |
| 3 : Kondisi kritis | |

Gambar 2.1 Trajektori satu generator yang terhubung ke bus *infinite* tanpa *damper winding* [4]

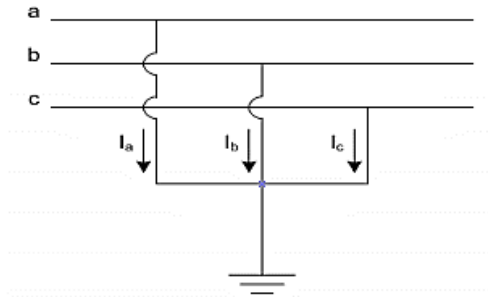
Waktu pemutus kritis atau *critical clearing time (CCT)* merupakan batas waktu pemutusan gangguan oleh pemutus daya yang menentukan stabil dan tidak stabilnya sistem. Apabila gangguan dihilangkan sebelum waktu pemutus kritisnya maka sistem akan dalam kondisi stabil. Sebaliknya jika gangguan diputus melebihi CCT maka sistem akan berada pada kondisi tidak stabil. Dengan menggunakan *energi function*, CCT dapat dihitung dengan menghitung perbedaan waktu antara SEP dan *exit point*.

2.4 Jenis-Jenis Gangguan

Gangguan yang terjadi pada sistem tenaga menyebabkan perubahan pada kondisi operasi sistem tenaga sehingga tidak sama dengan sebelum gangguan. Biasanya akibat yang ditimbulkan gangguan adalah terjadinya peningkatan arus dan tegangan melebihi batas operasi normal pada titik-titik tertentu. Hal inilah yang menyebabkan peralatan proteksi sistem tenaga bekerja. Berbagai macam variasi gangguan yang dapat muncul pada saluran transmisi terbagi menjadi gangguan simetri dan asimetri.

2.4.1 Gangguan Simetri

Gangguan simetri dalam sistem tenaga adalah gangguan hubung singkat 3 fasa. Gangguan 3 fasa merupakan gangguan yang sangat jarang terjadi namun gangguan ini adalah gangguan yang paling parah sehingga digunakan untuk menentukan spesifikasi rating pemutus daya. Contoh gangguan 3 fasa adalah hubung singkat secara tiba-tiba pada terminal generator.



Gambar 2. 2 Gangguan 3 fasa ke tanah

Perhitungan gangguan 3 fasa seimbang hanya perlu menggunakan analisa rangkaian ekuivalen satu fasa dengan semua besaran baik tegangan, arus maupun impedansi diubah menjadi besaran per unit (pu). Perhitungan besarnya arus hubung singkat menggunakan perkalian matriks admitansi dengan tegangan bus atau dapat dibalik menjadi perkalian matriks impedansi (Z_{bus}) dengan arus sehingga diperoleh besar tegangan tiap bus.

Dimisalkan sistem 4 bus dengan bus yang mengalami hubung singkat 3 fasa adalah di bus 2. Tanda Δ dipilih untuk menunjukkan perubahan tegangan yang disebabkan oleh gangguan. Perhitungan matriks Z_{bus} ditunjukkan di bawah ini:

$$\begin{bmatrix} V_{1\Delta} \\ -V_f \\ V_{3\Delta} \\ V_{4\Delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -I_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Dengan menyelesaikan matriks di atas diperoleh:

$$I_f = \frac{V_f}{Z_{22}} \quad (2.9)$$

Dari perhitungan di atas maka dapat disimpulkan, secara umum untuk suatu gangguan yang terjadi pada bus k dengan mengabaikan arus-arus pragangguan,

$$I_f = \frac{V_f}{Z_{kk}} \quad (2.10)$$

Dan tegangan pasca gangguan pada bus n adalah:

$$V_n = V_f - \frac{Z_{nk}}{Z_{kk}} V_f \quad (2.11)$$

2.4.2 Gangguan Asimetri (*Unbalance Fault*)

Operasi sistem 3 fasa tidak seimbang (*unbalanced*) terjadi disebabkan oleh parameter sistem yang asimetri ataupun kondisi operasi yang asimetri. Parameter sistem yang tidak seimbang disebabkan oleh komponen-komponen misalnya transformator dan *phase shifters*. Sementara kondisi operasi tidak seimbang disebabkan oleh gangguan asimetri [6].

Gangguan asimetri meliputi gangguan satu fasa ke tanah, gangguan dua fasa, serta gangguan antar fasa. Sementara gangguan simetri hanya berupa gangguan tiga fasa ke tanah. Gangguan satu fasa ke tanah merupakan gangguan yang paling sering terjadi pada sistem tenaga yakni sekitar 70% dari total kejadian.

Gangguan simetri memiliki arus dan tegangan yang sama pada tiap fasanya yakni hanya memiliki komponen urutan positif. Sedangkan gangguan asimetri menyebabkan arus yang mengalir pada sistem tidak seimbang. Arus dan tegangan pada sistem memiliki komponen urutan negatif dan nol. Komponen urutan positif, urutan negatif dan urutan nol merupakan komponen tiga phasor seimbang.

Adanya pergeseran fasa komponen simetris pada arus dan tegangan sebesar 120° maka digunakan operator α yang menunjukkan perputaran sebesar 120° melawan perputaran arah jarum jam.

$$\alpha = 1 \angle 120^\circ = -0.5 + j0.866$$

Ketiga komponen simetris dinyatakan dengan subskrip tambahan 1 untuk urutan positif, 2 untuk urutan negatif dan 0 untuk urutan nol. Karena setiap fasor tak seimbang, fasor asli tegangan apabila dinyatakan dalam suku-suku komponennya adalah:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Dimana,

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

Persamaan berikut ini adalah persamaan dasar yang akan digunakan dalam analisis gangguan asimetri. Untuk generator yang dibebani secara konstan, dimana E_a adalah tegangan tanpa beban urutan positif ke netral, Z_1 dan Z_2 merupakan impedansi urutan positif dan negatif generator serta Z_0 merupakan impedansi urutan nol generator. Komponen simetri arus dan tegangan dengan fasa a yang terkena gangguan adalah:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

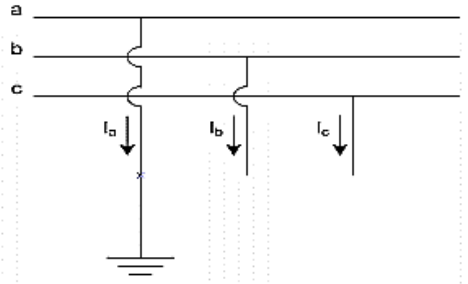
2.4.2.1 Gangguan 1 Fasa ke Tanah

Dimisalkan terjadi gangguan pada fasa a, maka arus pada fasa b dan c bernilai nol serta tegangan pada fasa a juga bernilai nol, seperti yang ditunjukkan gambar 2.3. Komponen simetri untuk arus dan tegangan adalah:

$$I_{012} = A^{-1} I_{abc} \quad (2.14)$$

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = \frac{1}{3} I_a \quad (2.15)$$

$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = 0 \quad (2.16)$$



Gambar 2. 3 Gangguan 1 fasa ke tanah

Dengan menyelesaikan perhitungan matriks (2.13) dengan mempertimbangkan kondisi arus dan tegangan pada persamaan (2.15) dan (2.16), maka diperoleh besar arus hubung singkat satu fasa ke tanah adalah:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{a1} \\ I_{a1} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Dengan mengalikan kedua ruas dengan matriks baris $[1 \ 1 \ 1]$ maka diperoleh:

$$V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = -I_{a1}Z_0 + E_a - I_{a1}Z_1 - I_{a1}Z_2 \quad (2.18)$$

$$0 = -I_{a1}Z_0 + E_a - I_{a1}Z_1 - I_{a1}Z_2 \quad (2.19)$$

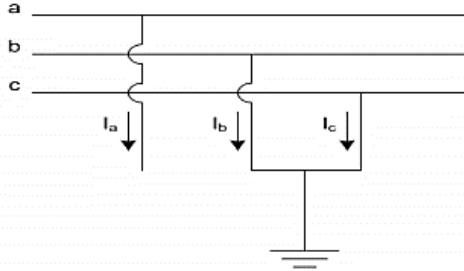
Dengan demikian diperoleh besar arus gangguan satu fasa ke tanah sebesar:

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (2.20)$$

Persamaan di atas digunakan dengan hubungan komponen simetri untuk menentukan semua tegangan dan arus pada gangguan.

2.4.2.2 Gangguan Dua Fasa ke Tanah

Dimisalkan fasa yang terkena gangguan adalah fasa b dan c seperti yang ditunjukkan Gambar 2.4. Oleh karena itu tegangan pada fasa b dan c bernilai nol serta arus pada fasa a bernilai nol.



Gambar 2.4 Gangguan 2 fasa ke tanah

Komponen-komponen simetris arus dan tegangan diberikan oleh:

$$V_{a0} = V_{a1} = V_{a2} = E_a - I_{a1}Z_1 \quad (2.21)$$

$$I_a = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = 0 \quad (2.22)$$

Substitusi persamaan (2.21) dan (2.22) di atas ke dalam persamaan awal (2.13) diperoleh:

$$\begin{bmatrix} E_a - I_{a1}Z_1 \\ E_a - I_{a1}Z_1 \\ E_a - I_{a1}Z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Penyelesaian matriks di atas dilakukan dengan mengalikan masing-masing ruas dengan invers matriks impedansi (Z^{-1}). Dengan demikian diperoleh besar arus hubung singkat dua fasa ke tanah adalah:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{Z_0} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{Z_1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{Z_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_a - I_{a1}Z_1 \\ E_a - I_{a1}Z_1 \\ E_a - I_{a1}Z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_0} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{Z_1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{Z_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Penyelesaian persamaan di atas dengan mempertimbangkan persamaan (2.22) diperoleh:

$$\frac{E_a}{Z_0} - I_{a1} \frac{Z_1}{Z_0} + \frac{E_a}{Z_1} - I_{a1} + \frac{E_a}{Z_2} - I_{a1} \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{E_a}{Z_1} \quad (2.25)$$

Dengan demikian besar arus gangguan dua fasa ke tanah adalah:

$$I_{a1} = \frac{E_a(Z_2 + Z_0)}{Z_1Z_2 + Z_1Z_0 + Z_2Z_0} \quad (2.26)$$

Persamaan di atas digunakan dengan hubungan komponen simetri untuk menentukan semua tegangan dan arus pada gangguan.

2.4.2.3 Gangguan Antar Fasa Langsung (Double Line)

Dimisalkan fasa yang terkena gangguan adalah fasa b dan c seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5. Kondisi akibat gangguan ini dinyatakan sebagai berikut:

$$V_b = V_c \quad I_a = 0 \quad I_b = -I_c \quad (2.27)$$

Perhitungan komponen-komponen simetris arus dan tegangan dengan mensubstitusikan kondisi gangguan persamaan (2.27) di atas diperoleh:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Sehingga didapatkan:

$$V_{a1} = V_{a2} \quad (2.29)$$

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Sedangkan untuk arus diperoleh:

$$I_{a0} = 0 \quad I_{a2} = -I_{a1} \quad (2.31)$$

Dengan substitusi persamaan (2.29) dan (2.31) ke persamaan (2.13) maka diperoleh besar arus hubung singkat antar fasa langsung adalah:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_{a1} \\ -I_{a1} \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

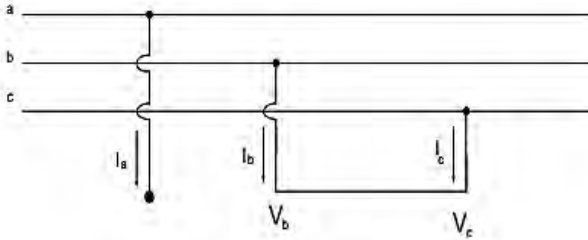
Dimana V_{a0} bernilai nol dikarenakan $I_{a0} = 0$ seperti yang ditunjukkan persamaan (2.29). Dengan menyelesaikan matriks di atas diperoleh:

$$0 = E_a - I_{a1}Z_1 - I_{a1}Z_2 \quad (2.33)$$

Dengan demikian diperoleh besar arus gangguan antar fasa langsung atau *line to line* sebesar:

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2} \quad (2.34)$$

Persamaan di atas digunakan dengan hubungan komponen simetri untuk menentukan semua tegangan dan arus pada gangguan.



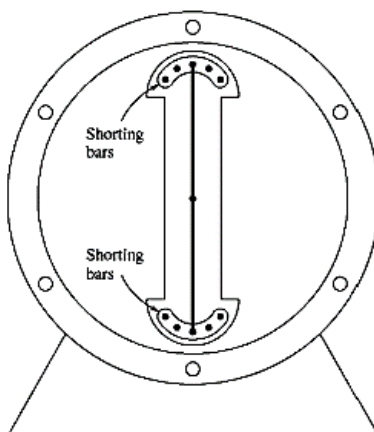
Gambar 2. 5 Gangguan Antar Fasa Langsung

2.5 Kumpanan Peredam (*Damper Winding*)

Damper winding atau kumpanan peredam merupakan suatu batangan yang dipasang pada kutub menonjol rotor mesin sinkron dan ujung-ujungnya dihubungkan. Adanya kumpanan ini meningkatkan kestabilan sistem tenaga secara keseluruhan dengan mengurangi atau meredam besar nilai daya dan torsi transient. Prinsip kerja kumpanan peredam ini secara umum adalah dengan torsi yang dihasilkan pada kumpanan peredam mampu meredam osilasi mekanis rotor.

Jika rotor berputar pada kecepatan sinkron, maka kumpanan peredam tidak memiliki tegangan induksi sama sekali. Jika rotor berputar lebih lambat dari kecepatan sinkron maka putaran relatif rotor terhadap medan magnet stator menyebabkan adanya induksi tegangan ke

kumparan peredam. Kumparan peredam merupakan rangkaian tertutup sehingga adanya tegangan induksi menimbulkan arus mengalir pada kumparan tersebut. Dengan demikian muncul medan magnet pada kumparan peredam. Interaksi antara medan magnet stator dengan medan magnet pada kumparan peredam akan menghasilkan torsi yang mempercepat rotor mendekati kecepatan sinkron. Sebaliknya jika rotor berputar lebih cepat dari medan magnet stator, torsi yang dihasilkan kumparan peredam akan memperlambat putaran rotor mendekati kecepatan sinkron. Oleh karena itu dengan adanya kumparan peredam mampu meredam osilasi mekanik rotor mesin sehingga meningkatkan kestabilan sistem tenaga.



Gambar 2. 6 Rotor Dua Kutub Menonjol Dengan *Damper Winding* [7]

BAB 3 PERHITUNGAN CCT

3.1 Aliran Daya

Studi aliran daya mempelajari daya yang mengalir pada saluran yakni berupa daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) dari pembangkit ke beban. Selain mengetahui daya yang mengalir pada tiap saluran, dengan analisis aliran daya juga dapat diketahui besarnya tegangan tiap bus, faktor daya tiap bus serta besar arus yang mengalir pada tiap saluran. Terdapat beberapa metode dalam menyelesaikan aliran daya pada suatu sistem tenaga antara lain metode Gauss-Seidel, Newton-Raphson dan Fast-Decoupled. Pada tugas akhir ini metode yang digunakan adalah metode Newton-Raphson.

Penyelesaian untuk masalah aliran beban adalah dengan menggunakan proses iterasi hingga mencapai nilai minimum *error* yang telah ditentukan. Untuk menerapkan metode Newton-Raphson pada penyelesaian persamaan aliran daya, tegangan bus dan admitansi saluran dinyatakan dalam bentuk polar.

Tegangan pada bus i dan bus j dalam bentuk polar adalah:

$$V_k = |V_k| \angle \delta_k \text{ dan } V_n = |V_n| \angle \delta_n \quad (3.1)$$

Besar admitansi saluran antara bus k dan n dalam bentuk polar adalah:

$$Y_{kn} = |Y_{kn}| \angle \theta_{kn} \quad (3.2)$$

Daya yang mengalir pada saluran antara bus k dan n adalah:

$$P_k - jQ_k = \sum_{n=1}^N |V_k V_n Y_{kn}| \angle (\theta_{kn} + \delta_n - \delta_k) \quad (3.3)$$

$$P_k = \sum_{n=1}^N |V_k V_n Y_{kn}| \cos(\theta_{kn} + \delta_n - \delta_k) \quad (3.4)$$

$$Q_k = - \sum_{n=1}^N |V_k V_n Y_{kn}| \sin(\theta_{kn} + \delta_n - \delta_k) \quad (3.5)$$

Dimana:

- V : Tegangan bus
- Y : Admitansi saluran
- P : Daya aktif
- Q : Daya reaktif

Pada perhitungan ini *swing* bus diabaikan karena pada *swing* bus baik besar tegangan maupun sudut tegangan telah ditentukan. Selain pada

swing bus, P dan Q merupakan konstanta karena telah ditetapkan. Sedangkan nilai tegangan dan sudut adalah besaran yang dihitung. Untuk menghitung nilai P_k dan Q_k digunakan nilai perkiraan awal untuk sudut dan tegangan, dari persamaan (3.4) dan (3.5) dan diperoleh:

$$\Delta P_k = P_{k,spec} - P_{k,calc} \text{ dan } \Delta Q_k = Q_{k,spec} - Q_{k,calc} \quad (3.6)$$

Dimana:

Subskrip “spec” : nilai daya yang ditetapkan

Subskrip “calc” : nilai daya hasil perhitungan

Dengan menggunakan deret taylor maka persamaan (3.4) dan (3.5) dapat diselesaikan. Dimana turunan parsial dengan orde lebih dari satu diabaikan. Oleh karena persamaan daya terdiri dari beberapa variabel, maka turunan parsial harus dilakukan terhadap masing-masing variabel. Dalam hal ini variabel tersebut adalah δ dan $|V|$. Apabila dituliskan dalam bentuk matriks, maka diperoleh persamaan:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \text{ atau } \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Dimana J adalah matriks Jacobian yang berisi:

$$H_{ij} = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} \quad N_{ij} = \frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} |V_j|$$

$$J_{ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} \quad L_{ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} |V_j|$$

Langkah pertama adalah menghitung nilai ΔP berdasarkan persamaan (3.6) pada setiap bus. Kemudian menghitung nilai-nilai untuk jacobian dengan menggunakan nilai perkiraan besar dan sudut tegangan dalam turunan parsial untuk persamaan (3.4) dan (3.5). Maka diperoleh koreksi-koreksi sudut $\Delta \delta$ dan tegangan ΔV dengan menginverskan jacobian matriks. Koreksi sudut dan tegangan inilah yang digunakan pada proses iterasi selanjutnya hingga dicapai kondisi konvergen.

3.2 Reduksi Matriks

Reduksi matriks atau reduksi jaringan menyederhanakan matriks sistem yang dilakukan dengan eliminasi *node* pada tiap langkahnya. Hal ini dilakukan karena tidak semua bus pada seluruh sistem diperlukan

dalam perhitungan. Dengan penomoran selektif bus sistem pada Y_{bus} , dilakukan eliminasi pada bus yang tidak diperlukan, sehingga baik tegangan maupun arus tidak muncul. Reduksi jaringan menghasilkan perhitungan yang efisien dan lebih terfokus langsung pada porsi sistem yang menjadi perhatian.

Arus pada bus yang tidak terhubung ke beban eksternal atau sumber selalu bernilai nol. Pada bus tersebut, tidak diperlukan perhitungan tegangan sehingga dapat dihilangkan dari matriks sistem. Misalnya, ketika $I_1 = 0$ pada sistem 4 bus, matriks admitansi sistem dapat dituliskan:

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Besar arus pada bus 1 adalah nol sehingga perhitungan tegangan ada bus 1 (V_1) diabaikan, termasuk admitansi yang terhubung ke bus 1 juga diabaikan. Eliminasi pada *node* 1 menghasilkan matriks $(N-1) \times (N-1)$ sehingga diperoleh matriks sistem 3×3 :

$$\begin{bmatrix} Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Sistem dimana node arus bernilai nol dieliminasi seperti yang dijelaskan *Kron reduced* pada referensi [5]. Pada analisa kestabilan transien, perhitungan dilakukan saat terjadi gangguan transien seperti hubung singkat sehingga arus kontribusi akibat gangguan hanya berasal dari sumber dan pada beban tidak mengalir arus. Oleh karena itu bus beban dapat direduksi dari matriks sistem.

Elemen baru matriks admitansi setelah dilakukan reduksi jaringan dengan Kron dapat langsung diperoleh dengan persamaan berikut:

$$Y_{jk(new)} = Y_{jk} - \frac{Y_{jp}Y_{pk}}{Y_{pp}} \quad (3.10)$$

Dimana subskrip persamaan di atas:

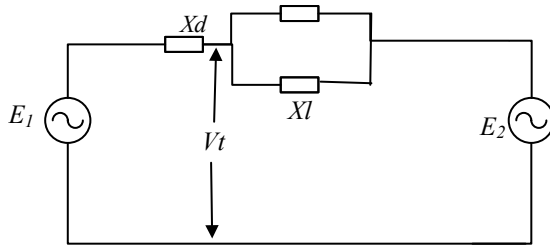
j dan k : semua bus pada sistem kecuali bus yang direduksi

p : bus yang direduksi

3.3 Pemodelan Sistem Tenaga

Sistem tenaga dimodelkan memiliki saluran transmisi *double circuit* sehingga saat terjadi gangguan, kontinuitas daya tetap tersalurkan. Gambar 3.1 di bawah ini merupakan rangkaian ekuivalen sistem dua generator sebelum gangguan dimana:

- E : tegangan generator
- X_d : reaktansi generator
- X_l : reaktansi saluran transmisi
- V_t : tegangan terminal generator



Gambar 3. 1 Rangkaian ekuivalen sebelum gangguan

Berdasarkan Gambar 3.1 di atas dapat diperoleh:

$$E_1 = Ix_d + V_t \quad (3.11)$$

$$V_t = Ix_l + E_2 \quad (3.12)$$

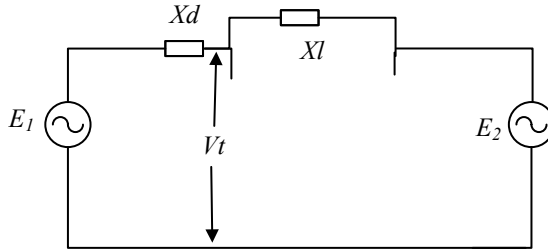
Dari kedua persamaan di atas bila disubstitusikan diperoleh:

$$E_1 = I(x_d + x_l) + E_2 \quad (3.13)$$

$$I = \frac{E_1 - E_2}{x_d + x_l} = \frac{E_1 - E_2}{x} \quad (3.14)$$

Substitusikan persamaan (3.14) ke dalam persamaan (3.11)

$$V_t = E_1 - Ix_d = E_1 - \frac{E_1 - E_2}{x} x_d = \frac{E_1 x_l + E_2 x_d}{x} \quad (3.15)$$



Gambar 3. 2 Rangkaian ekuivalen setelah gangguan

Gangguan muncul pada saluran kedua pada saluran transmisi. Akibatnya pemutus daya bekerja dengan membuka saluran kedua. Oleh karena itu penyaluran daya hanya dilakukan oleh satu saluran setelah gangguan terjadi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.2.

Sebagaimana yang telah dijelaskan pada Bab 2 mengenai persamaan ayunan, persamaan gerak rotor untuk sistem multimesin adalah:

$$M_i \dot{\omega}_i = P_{mi} - P_{ei}(\delta) - D_i(\omega_i - \omega_s) \quad (3.16)$$

$$\dot{\omega}_i = \frac{1}{M_i} (P_{mi} - P_{ei}(\delta) - D_i(\omega_i - \omega_s)) \quad (3.17)$$

Dengan $\dot{\delta}_i$ merupakan selisih kecepatan sudut generator dengan kecepatan sinkron, atau dapat dituliskan sebagai:

$$\dot{\delta}_i = \omega_i - \omega_s \quad (3.18)$$

Sedangkan daya elektrik generator diperoleh berdasarkan aliran daya dalam bentuk polar dituliskan dalam persamaan (3.19) dan dapat disederhanakan menjadi persamaan (3.20)

$$P_{ei}(\delta) = \sum_j^n E_i E_j Y_{ij} \cos(-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij}) \quad (3.19)$$

$$P_{ei}(\delta) = E_i^2 G_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^n E_i E_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (3.20)$$

Dimana:

- M : Konstanta kelembaman (*inertia constant*)
- ω : Kecepatan sudut rotor generator
- P_m : Daya mekanis generator
- P_e : Daya elektrik generator
- D : Koefisien *dampers winding*

- ω_s : Kecepatan sinkron generator
 Y_{ij} : Admitansi saluran antara bus i dan j
 G : Konduktansi saluran dengan nilai $G_{ij} = Y_{ij} \cos \theta_{ij}$
 B : Suseptansi saluran dengan nilai $B_{ij} = Y_{ij} \sin \theta_{ij}$

Oleh karena itu persamaan (3.17) hingga (3.20) untuk masing-masing generator pada sistem 2 mesin yang ditunjukkan pada Gambar 3.1 dapat dituliskan:

Generator 1:

$$\dot{\omega}_1 = \frac{1}{M_1} (P_{m1} - P_{e1}(\delta) - D_1(\omega_1 - \omega_s)) \quad (3.21)$$

$$\dot{\delta}_1 = \omega_1 - \omega_s \quad (3.22)$$

$$P_{e1}(\delta) = E_1^2 G_{11} + E_1 E_2 (G_{12} \cos \delta_{12} + B_{12} \sin \delta_{12}) \quad (3.23)$$

Generator 2:

$$\dot{\omega}_2 = \frac{1}{M_2} (P_{m2} - P_{e2}(\delta) - D_2(\omega_2 - \omega_s)) \quad (3.24)$$

$$\dot{\delta}_2 = \omega_2 - \omega_s \quad (3.25)$$

$$P_{e2}(\delta) = E_2^2 G_{22} + E_2 E_1 (G_{21} \cos \delta_{21} + B_{21} \sin \delta_{21}) \quad (3.26)$$

Linearisasi persamaan (3.23) diperoleh:

$$\Delta P_{e1} = E_1 E_2 (-G_{12} \sin \delta_{12} + B_{12} \cos \delta_{12}) \Delta \delta_1 + E_1 E_2 (G_{12} \sin \delta_{12} - B_{12} \cos \delta_{12}) \Delta \delta_2 \quad (3.27)$$

$$\Delta P_{e1} = -E_1 E_2 (G_{12} \sin \delta_{12} - B_{12} \cos \delta_{12}) \Delta \delta_1 + E_1 E_2 (G_{12} \sin \delta_{12} - B_{12} \cos \delta_{12}) \Delta \delta_2 \quad (3.28)$$

Persamaan (3.28) dapat dituliskan dalam $\Delta \delta_{12}$ sebagai berikut:

$$\Delta P_{e1} = -E_1 E_2 (G_{12} \sin \delta_{12} - B_{12} \cos \delta_{12}) \Delta \delta_{12} \quad (3.29)$$

Linearisasi persamaan (3.26) diperoleh:

$$\Delta P_{e2} = E_2 E_1 (G_{21} \sin \delta_{21} - B_{21} \cos \delta_{21}) \Delta \delta_1 + E_2 E_1 (-G_{21} \sin \delta_{21} + B_{21} \cos \delta_{21}) \Delta \delta_2 \quad (3.30)$$

$$\Delta P_{e2} = E_2 E_1 (G_{21} \sin \delta_{21} - B_{21} \cos \delta_{21}) \Delta \delta_1 - E_2 E_1 (G_{21} \sin \delta_{21} - B_{12} \cos \delta_{12}) \Delta \delta_2 \quad (3.31)$$

Persamaan (3.31) dapat dituliskan dalam $\Delta \delta_{21}$ sebagai berikut:

$$\Delta P_{e2} = -E_2 E_1 (G_{21} \sin \delta_{21} - B_{21} \cos \delta_{21}) \Delta \delta_{21} \quad (3.32)$$

Diasumsikan bahwa $\delta_{12} = -\delta_{21}$, $G_{12} = G_{21}$, $B_{12} = B_{21}$ substitusikan persamaan (3.23) dan (3.26):

$$P_{e1}(\delta) = E_1^2 G_{11} + E_2 E_1 (G_{21} \cos \delta_{21} - B_{21} \sin \delta_{21}) \quad (3.33)$$

$$P_{e2}(\delta) = E_2^2 G_{22} + E_1 E_2 (G_{12} \cos \delta_{12} - B_{12} \sin \delta_{12}) \quad (3.34)$$

Linearisasi persamaan (3.33) di atas diperoleh:

$$\Delta P_{e1} = E_2 E_1 (G_{21} \sin \delta_{21} + B_{21} \cos \delta_{21}) \Delta \delta_1 + E_2 E_1 (-G_{21} \sin \delta_{21} - B_{21} \cos \delta_{21}) \Delta \delta_2 \quad (3.35)$$

$$\Delta P_{e1} = E_2 E_1 (G_{21} \sin \delta_{21} + B_{21} \cos \delta_{21}) \Delta \delta_1 - E_2 E_1 (G_{21} \sin \delta_{21} + B_{21} \cos \delta_{21}) \Delta \delta_2 \quad (3.36)$$

Persamaan (3.36) dapat dituliskan dalam $\Delta \delta_{21}$ sebagai berikut:

$$\Delta P_{e1} = -E_2 E_1 (G_{21} \sin \delta_{21} + B_{21} \cos \delta_{21}) \Delta \delta_{21} \quad (3.37)$$

Linearisasi persamaan (3.34) di atas diperoleh:

$$\Delta P_{e2} = E_1 E_2 (-G_{21} \sin \delta_{21} - B_{21} \cos \delta_{21}) \Delta \delta_1 + E_1 E_2 (G_{12} \sin \delta_{12} + B_{12} \cos \delta_{12}) \Delta \delta_2 \quad (3.38)$$

$$\Delta P_{e2} = -E_1 E_2 (G_{12} \sin \delta_{12} + B_{12} \cos \delta_{12}) \Delta \delta_1 + E_1 E_2 (G_{12} \sin \delta_{12} + B_{12} \cos \delta_{12}) \Delta \delta_2 \quad (3.39)$$

Persamaan (3.39) dapat dituliskan dalam $\Delta \delta_{12}$ sebagai berikut:

$$\Delta P_{e2} = -E_1 E_2 (G_{12} \sin \delta_{12} + B_{12} \cos \delta_{12}) \Delta \delta_{12} \quad (3.40)$$

State space sistem dua mesin dengan mempertimbangkan persamaan-persamaan linearisasi di atas dapat dituliskan dalam matriks berikut:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\omega}_1 \\ \Delta \dot{\delta}_1 \\ \Delta \dot{\omega}_2 \\ \Delta \dot{\delta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{D_1}{M_1} & \frac{E_1 E_2}{M_1} (G_{12} \sin \delta_{12} - B_{12} \sin \delta_{12}) & 0 & -\frac{E_1 E_2}{M_1} (G_{12} \sin \delta_{12} - B_{12} \sin \delta_{12}) \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{E_2 E_1}{M_2} (G_{21} \sin \delta_{21} - B_{21} \sin \delta_{21}) & \frac{E_2 E_1}{M_2} (G_{21} \sin \delta_{21} - B_{21} \sin \delta_{21}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega_1 \\ \Delta \delta_1 \\ \Delta \omega_2 \\ \Delta \delta_2 \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

Jika sistem tidak memakai *dampers winding*, maka *dampers winding* pada matriks di atas diberi nilai nol. Secara ringkas matriks di atas dapat dituliskan sebagai:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\omega}_i \\ \Delta \dot{\delta}_i \end{bmatrix} = A \text{ matrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega_i \\ \Delta \delta_i \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

Matriks A merupakan fungsi δ dimana untuk masing-masing generator bernilai:

$$\sin\delta_{e1} = \frac{P_m X_{12}}{E_1 E_2} ; \sin\delta_{e2} = \frac{P_m X_{21}}{E_1 E_2} \quad (3.43)$$

Dengan demikian dapat ditentukan *eigenvalue* matriks A dari persamaan berikut:

$$|A - \lambda I| = 0 \quad (3.44)$$

Solusi dari persamaan di atas dengan I merupakan matriks identitas adalah $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$. Eigenvector matriks A untuk masing-masing *eigenvalue* adalah:

$$|A - \lambda I|v = 0 \quad (3.45)$$

Dari *eigenvector* yang diperoleh, dapat ditentukan SEP (*Stable Equilibrium Point*) dan UEP (*Unstable Equilibrium Point*) sistem.

3.4 Perumusan Masalah

Ada tiga kondisi dalam kestabilan transien yakni kondisi sebelum gangguan, selama gangguan dan setelah gangguan. Kondisi awal sebelum gangguan x_{pre} , sistem tenaga beroperasi pada titik kestabilannya. Kemudian muncul gangguan pada $t=0$ hingga $t=\tau$ sehingga sistem mengalami gangguan selama $[0, \tau]$

$$\dot{x} = f_F(x), 0 \leq t \leq \tau, x(0) = x_{pre} \quad (3.46)$$

Dimana $x \in R^N, t \in R, f_F: R^N \rightarrow R^N$

Kurva penyelesaian dari persamaan di atas adalah *fault-on trajectory*, yakni lintasan saat terjadi gangguan yang dituliskan sebagai:

$$x(t) = X_F(t; x_{pre}), 0 \leq t \leq \tau \quad (3.47)$$

Dimana $X_F(t; x_{pre}): R \rightarrow R^N$

Gangguan dihilangkan pada saat $t=\tau$. Persamaan sistem setelah gangguan (*post-fault*) adalah:

$$\dot{x} = f(x), \tau \leq t \leq \infty; f: R^N \rightarrow R^N \quad (3.48)$$

Kurva penyelesaian persamaan di atas disebut sebagai *post fault trajectory* yaitu lintasan setelah terjadi gangguan yang dituliskan sebagai:

$$x(t) = X(t; x^0), \tau \leq t \leq \infty; X(t; x^0): R^N \rightarrow R^N \quad (3.49)$$

Dimana x^0 adalah titik awal pada lintasan gangguan (*fault on trajectory*) saat $t=\tau$.

$$x^0 = X_F(\tau; x_{pre}) \quad (3.50)$$

Titik awal pada persamaan di atas adalah pada lintasan gangguan saat gangguan dihilangkan pada CCT, sehingga dapat dituliskan kembali menjadi:

$$x^0 = X_F(CCT; x_{pre}) \quad (3.51)$$

3.4.1 Metode Rungekutta Orde 4

Nilai awal (*Initial Point*) x^0 untuk menggambarkan kondisi dicari menggunakan metode Rungekutta orde 4. Besaran inilah yang diperlukan dalam menyelesaikan *critical trajectory*. Berdasarkan jumlah yang efektif dalam deret Taylor, Rungekutta dibagi menjadi beberapa orde. Orde yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah Rungekutta orde 4.

Persamaan umum x dimana nilai x diperoleh ketika $t = t_0 + \Delta t$ untuk orde ke $(n+1)^{st}$ adalah:

$$X_{n+1} = X_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (3.52)$$

Dimana,

$$k_1 = f(X_n, t_n)\Delta t \quad (3.53)$$

$$k_2 = f\left(X_n + \frac{k_1}{2}, t_n + \frac{\Delta t}{2}\right)\Delta t \quad (3.54)$$

$$k_3 = f\left(X_n + \frac{k_2}{2}, t_n + \frac{\Delta t}{2}\right)\Delta t \quad (3.55)$$

$$k_4 = f(X_n + k_3, t_n + \Delta t)\Delta t \quad (3.56)$$

Intepretasi fisik dari persamaan di atas adalah;

k_1 = (lengkungan pada saat awal *time step*)* Δt

k_2 = (pendekatan pertama pada lengkungan di pertengahan step)* Δt

k_3 = (pendekatan kedua pada lengkungan di pertengahan step) * Δt

k_4 = (lengkungan pada akhir step)* Δt

3.4.2 Modifikasi Persamaan Trapezoidal

Modifikasi persamaan trapezoidal merupakan langkah awal dalam menggambarkan *critical trajectory*. Berdasarkan persamaan (3.49) pada saat t^k variabel t diubah menjadi x sehingga persamaan tersebut dinotasikan menjadi x^k . Persamaan *trapesoidal* konvensional adalah sebagai berikut:

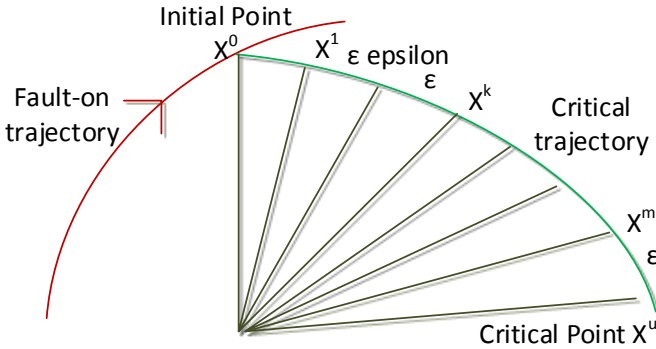
$$x^{k+1} - x^k = \frac{1}{2}(\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k)(t^{k+1} - t^k) \quad (3.57)$$

Dimana

$$\dot{x}^k = f(x^k)$$

Pada persamaan ini k digunakan sebagai nomor transisi terhadap waktu.

Sesuai dengan definisi *critical trajectory* yakni lintasan yang dimulai dari lintasan gangguan sampai pada titik kritisnya. Modifikasi persamaan trapezoidal menitikberatkan pada kondisi ketika gangguan dihilangkan saat CCT dan variabel-variabel berada pada kondisi kritis. Gambar 3.3 menunjukkan lintasan kritis (*critical trajectory*) yang dimulai dari titik awal x^0 yakni saat pemutusan gangguan pada CCT dan berakhir di titik akhir x^u pada kondisi kritisnya yakni saat mencapai UEP. Pada gambar tersebut lintasan gangguan digambarkan dengan kurva warna merah sementara kurva hijau merupakan penggambaran *critical trajectory*. Titik awal dianggap sebagai pemutusan gangguan saat CCT oleh karena itu, dari titik tersebut ditarik garis lurus sampai ke titik akhirnya. Dimana masing-masing titik terhubung dengan menggunakan metode trapezoidal.



Gambar 3.3 Modifikasi Trapezoidal

Metode baru untuk integrasi numerik telah dikembangkan untuk mengatasi waktu yang ditempuh dalam mencapai titik UEP yakni dengan mentransformasikan waktu yang diperlukan untuk mencapai titik akhir menjadi jarak. Pertama, jarak antara dua titik yang disimbolkan dengan epsilon ϵ didefinisikan sebagai:

$$\epsilon = |x^{k+1} - x^k| = \frac{1}{2} |\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k| (t^{k+1} - t^k) \quad (3.58)$$

Kemudian waktu ditransformasikan menjadi jarak yang ditunjukkan persamaan berikut:

$$(t^{k+1} - t^k) = \frac{2}{|\dot{x}^{k+1} - \dot{x}^k|} \varepsilon \quad (3.59)$$

Dengan persamaan (3.59) disubstitusikan ke dalam persamaan (3.57) diperoleh modifikasi trapezoidal sebagai berikut:

$$x^{k+1} - x^k - \frac{\dot{x}^{k+1} - \dot{x}^k}{|\dot{x}^{k+1} - \dot{x}^k|} \varepsilon = 0 \quad (3.60)$$

Dengan demikian, integrasi numerik terhadap domain waktu ditransformasikan menjadi integrasi terhadap domain jarak.

3.4.3 Kondisi Kritis Sinkronisasi

Hilangnya sinkronisasi pada single mesin adalah saat $\partial T / \partial \theta = 0$ atau $\partial P / \partial \theta = 0$. Dimana T merupakan torsi sinkron dan P daya sinkron serta θ sudut rotor. Sedangkan untuk kondisi multimesin dapat dituliskan berdasarkan kondisi singularitas dari koefisien matriks sinkronisasi berikut:

$$0 = \left[\frac{\partial P}{\partial \theta} \right] \cdot v \quad \text{dengan } v \neq 0 \quad (3.61)$$

Dimana: $v \in R^{N_{Gen}}$ adalah *eigenvector* yang berhubungan dengan matrik *zero eigenvalue* $[\partial P / \partial \theta] \in R^{N_{Gen} \times N_{Gen}}$, dan N_{Gen} adalah jumlah dari generator. Kondisi *eigenvector* harus sesuai dengan perubahan arah dari θ , yang dapat ditulis seperti di bawah ini, dengan $k_s \in R$:

$$v = k_s \cdot \dot{\theta} \quad (3.62)$$

Diasumsikan bahwa kondisi persamaan di atas berada pada titik akhir pada trajektori kritis. Persamaan yang merepresentasikan suatu kondisi ketika torsi atau daya sinkron adalah:

$$\dot{P} = 0 \quad (3.63)$$

Karena P pada dasarnya merupakan fungsi sudut rotor generator, maka persamaan di atas dapat dituliskan menjadi:

$$\dot{P} = \frac{\partial P}{\partial \theta} \cdot \dot{\theta} \quad (3.64)$$

3.3.4 Metode Newton Raphson

Suatu fungsi $G(X)$ dimana penyelesaian dari fungsi tersebut adalah X_s . *Initial condition* fungsi adalah X_0 dan selisih nilai sebenarnya

dengan hasil perhitungan atau *error* dimisalkan ΔX . Dengan demikian dapat dituliskan persamaan penyelesaian untuk fungsi $G(X)$ adalah:

$$X_s = X_0 + \Delta X \quad (3.65)$$

Selanjutnya mensubstitusikan persamaan X_s di atas pada *input* X fungsi $G(X)$ dan menggunakan deret Taylor untuk menyelesaikannya. Persamaan umum deret Taylor ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$f(x) = f(x_0) + \frac{(x-x_0)}{1!} f'(x_0) + \dots + \frac{(x-x_0)^m}{m!} f^{(m)}(x_0) + \dots \quad (3.66)$$

Kemudian substitusi ke dalam deret Taylor yang ditunjukkan pada persamaan (3.66) tetapi dengan batasan orde hingga orde dua diperoleh:

$$G(X_0 + \Delta X) \cong G(X_0) + \left[\frac{\partial G(X_0)}{\partial X} \right] \Delta X \quad (3.67)$$

Penyelesaian fungsi $G(X)$ dengan *error* mendekati nol adalah $G(X_s) = 0$ sehingga persamaan (3.67) dapat ditulis ulang menjadi:

$$G(X_0) + J\Delta X \cong 0 \quad (3.68)$$

Dimana J merupakan matriks Jacobian dengan nilai:

$$J = \frac{\partial G(X)}{\partial X} \quad (3.69)$$

Error yang diperoleh digunakan sebagai nilai inisiasi awal fungsi $G(X_0)$. *Error* keseluruhan yang digunakan pada matriks Jacobian diminimalisasi menjadi:

$$f = (G(X_0) + J\Delta X)^T (G(X_0) + J\Delta X) \quad (3.70)$$

Turunan pertama persamaan di atas untuk mendapatkan nilai ΔX :

$$f' = J^T (G(X_0) + J\Delta X)^T (G(X_0) + J\Delta X) J = 0 \quad (3.71)$$

$$\Delta X = -(J^T J)^{-1} J^T G(X_0) \quad (3.72)$$

Nilai ΔX yang diperoleh digunakan untuk memperbaiki hasil penyelesaian X_s awal dan hal ini dilakukan terus menerus hingga diperoleh kondisi konvergen yang ditentukan.

$$X_{new} = X_{old} + \Delta X \quad (3.73)$$

3.4.5 Matriks Jacobian *Losing Synchronism*

Critical trajectory diperoleh dengan proses iterasi hingga dicapai kondisi konvergen menggunakan metode newton raphson seperti yang dijelaskan sub bab sebelumnya. Kondisi awal (*initial condition*) trajektori

kritis adalah saat gangguan dihilangkan pada CCT dan berakhir pada titik akhir (*end point*) saat generator kehilangan sinkronisasinya. Matriks Jacobian untuk titik akhir pada metode hilangnya sinkronisasi adalah:

Persamaan 1

Persamaan pertama ini berdasarkan pada persamaan ayunan dengan P_m merupakan daya mekanis generator dan P_e merupakan daya listrik generator. Persamaan (3.74) merupakan persamaan yang menunjukkan percepatan yang terjadi.

$$P^{m+1} = P_{m_i}^{m+1} - P_{e_i}^{m+1}(\theta) \quad (3.74)$$

$$P^{m+1} = P_{m_i}^{m+1} - \sum_{j=i}^{NG} Y_{ij}^{m+1} E_i^{m+1} E_j^{m+1} \cos(-\theta_i^{m+1} + \theta_j^{m+1} + \alpha_{ij}^{m+1}) \quad (3.75)$$

$$\sum_{i=1}^{NG} \sum_{j=1, j \neq i}^{NG} [G_{ij}^{m+1} E_i^{m+1} E_j^{m+1} \sin \theta_{ij}^{m+1} + B_{ij}^{m+1} E_i^{m+1} E_j^{m+1} \cos \theta_{ij}^{m+1}] \quad (3.76)$$

Berdasarkan persamaan (3.76) dimana G merupakan konduktansi saluran dan B merupakan susceptansi saluran, maka diperoleh komponen matriks Jacobian J_1 :

$$J_1 = \frac{\partial P^{m+1}}{\partial \theta^{m+1}} v = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1^{m+1}}{\partial \theta_1^{m+1}} & \cdots & \frac{\partial P_1^{m+1}}{\partial \theta_{NG}^{m+1}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_{NG}^{m+1}}{\partial \theta_1^{m+1}} & \cdots & \frac{\partial P_{NG}^{m+1}}{\partial \theta_{NG}^{m+1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_{NG} \end{bmatrix} \quad (3.77)$$

Dimana NG merupakan jumlah generator dan v merupakan *eigenvector*,

$$\frac{\partial P_i^{m+1}}{\partial \theta_j^{m+1}} = G_{ij}^{m+1} E_i^{m+1} E_j^{m+1} \sin \theta_{ij}^{m+1} - B_{ij}^{m+1} E_i^{m+1} E_j^{m+1} \cos \theta_{ij}^{m+1} \quad (3.78)$$

Turunan pertama matriks Jacobian J_1 sebagai fungsi θ dan v adalah:

$$\partial J_1 = \frac{\partial J_1}{\partial \theta} + \frac{\partial J_1}{\partial v} \quad (3.79)$$

Dengan uraian masing-masing dijelaskan sebagai berikut:

$$\frac{\partial J_1}{\partial \theta} = \frac{\partial \left(\frac{\partial P^{m+1}}{\partial \theta^{m+1}} \right)}{\partial \theta_i^{m+1}} v ; i = 1, 2, \dots, NG \quad (3.80)$$

$$\frac{\partial J_1}{\partial v} = \frac{\partial P^{m+1}}{\partial \theta^{m+1}} \quad (3.81)$$

Persamaan 2

Persamaan kedua berhubungan dengan *eigenvector* dimana diasumsikan *eigenvector* harus sesuai dengan arah θ . Sedangkan k_s merupakan besaran skalar $k_s \in R$

$$J2 = v - k_s \dot{\theta}^{m+1} \quad (3.82)$$

$$\frac{\partial J2}{\partial v} = \frac{\partial J2}{\partial \theta^{m+1}} \quad (3.83)$$

Persamaan (3.83) merupakan turunan pertama persamaan (3.82) sebagai fungsi θ dan v , dengan uraian masing-masing dijelaskan sebagai berikut:

$$\frac{\partial J2}{\partial v} = \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.84)$$

$$\frac{\partial J2}{\partial \theta^{m+1}} = k_s \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.85)$$

Persamaan 3

$$J3 = |v| - 1 \quad (3.86)$$

$$\frac{\partial J3}{\partial v} = \frac{v}{|v|} \quad (3.87)$$

Ketiga persamaan di atas digunakan pada matriks Jacobian untuk metode hilangnya sinkronisasi yang ditunjukkan Gambar 3.4. Sedangkan A Jacobian matriks menunjukkan matriks Jacobian yang digunakan untuk sistem dengan model generator tanpa menggunakan kontroler. Dimana *end point conditions* merupakan pendefinisian titik akhir berdasarkan metode yang digunakan, yakni metode hilangnya sinkronisasi. Perumusan untuk titik akhir ini diberikan pada persamaan 1, 2 dan 3 yang telah dijelaskan sebelumnya.

$$\begin{array}{c}
\text{NODE x NG x (m+2) + 2 x NG + 1} \\
\begin{array}{c}
\text{1} \\
\text{NG} \\
\left\{ \begin{array}{l} \partial P_1^{m+1} / \partial \theta_1^{m+1} \\ \vdots \\ \partial P_{NG}^{m+1} / \partial \theta_{NG}^{m+1} \end{array} \right\} \\
\text{NG} \\
\left\{ \begin{array}{l} v_1 \\ \vdots \\ v_{NG} \end{array} \right\} \\
\left\{ k_s \right\}
\end{array}
\end{array}
\begin{array}{c}
\text{NODE x NG x (m+2)} \\
\text{NODE x NG x (m+2)+2} \quad \text{NG} \quad \text{1} \\
\left[\begin{array}{ccc}
A \text{ Jacobian Matrix} & \wedge & \\
v_1 \cdots v_2 & k_s & \\
0 \cdots 0 & 0 & \\
\vdots \ddots \vdots & \vdots & \\
0 \cdots 0 & 0 & \\
\text{End} & \text{Point} & \text{Conditions} \\
\text{①} & \text{②} & \text{③}
\end{array} \right]
\end{array}$$

Gambar 3. 4 Matriks Jacobian Hilangnya Sinkronisasi

$$\begin{array}{c}
\text{NODE x NG} \\
\text{NG x (m+1)} \\
\left\{ \begin{array}{l} \tilde{\omega}_1^0 \\ \vdots \\ \tilde{\omega}_{NG}^m \\ \theta_1^0 \\ \vdots \\ \theta_{NG}^m \\ f_{\tilde{\omega}_1} \\ \vdots \\ f_{\tilde{\omega}_{NG}} \end{array} \right\}
\end{array}
\begin{array}{c}
\text{NG x (m+2)} \quad \text{NG x (m+2)} \quad \text{1} \quad \text{1} \\
\overbrace{\tilde{\omega}_1^0 \cdots \tilde{\omega}_{NG}^{m+1}} \quad \overbrace{\theta_1^0 \cdots \theta_{NG}^{m+1}} \quad \underbrace{\varepsilon} \quad \underbrace{\tau} \\
\left[\begin{array}{cccc}
A\tilde{\omega}\tilde{\omega} & A\tilde{\omega}\theta & A\tilde{\omega}\varepsilon & A\tilde{\omega}\tau \\
A\theta\tilde{\omega} & A\theta\theta & A\theta\varepsilon & A\theta\tau \\
Af\tilde{\omega} & Af\theta & Af\varepsilon & Af\tau
\end{array} \right]
\end{array}$$

NODE : Number of Ordinary Differential Equation

NG : Number Generator; A : Xd' Generator Model

Gambar 3. 5 Konfigurasi Matriks Jacobian untuk Pemodelan Generator tanpa Kontroler

3.4.6 Critical Trajectory Metode Hilangnya Sinkronisasi

Permasalahan untuk memperoleh kondisi kritis sebagai titik akhir (*end point*) untuk kestabilan transient dirumuskan sebagai berikut:

$$\min_{x^0, x^1, \dots, x^{m+1}, \varepsilon, \tau, k_s, v} \left\{ \sum_{k=0}^m (\mu^k)' (\mu^k) + (\mu^{m+1})' W (\mu^{m+1}) \right\} \quad (3.88)$$

Dimana $x^k \in R^N$, $\varepsilon \in R$, $\tau \in R$, $k_s \in R$, $v \in R^{N_{Gen}}$

μ^k diperoleh pada perumusan minimalisasi di atas berdasarkan persamaan trapezoidal yang dijelaskan sebelumnya:

$$\mu^k = x^{k+1} - x^k - \frac{\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k}{|\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k|} \varepsilon \quad (3.89)$$

Persamaan sistem pada persamaan di atas didefinisikan dengan:

$$\dot{x}^k = f(x^k) \quad (3.90)$$

Dengan batasan

$$x^0 = X_F(\tau, x_{pre}) \quad (3.91)$$

$$\mu^{m+1} = \begin{bmatrix} \frac{\partial p^{m+1}}{\partial \theta^{m+1}} \cdot v \\ v - k_s \cdot \dot{\theta}^{m+1} \\ |v| - 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (3.92)$$

Dimana W adalah matriks pembobot dengan diagonal matriks bernilai positif dan nilai matriks ini tidak mempengaruhi konvergensi atau akurasi hasil yang diperoleh. Oleh karena itu, matriks identitas digunakan untuk W . Minimalisasi pada persamaan (3.88) menghasilkan μ^k nol. Persamaan *trapezoidal* akan menghubungkan ke semua titik x^k dari nilai $k=0$ hingga $k = m + 1$. Himpunan titik-titik x^k ini merepresentasikan trajektori kritis, dimana ε secara otomatis diperoleh ketika banyaknya integrasi (m) ditentukan. Besar nilai m merupakan parameter yang penting yang berdampak pada akurasi dan waktu perhitungan dikarenakan m proporsional dengan perumusan minimalisasi

Persamaan (3.91) merupakan kondisi batasan untuk titik awal x^0 , dimana persamaan ini menunjukkan lintasan gangguan (*fault-on trajectory*) sebagai fungsi dari waktu pemutusan gangguan, τ . Sedangkan persamaan (3.92) adalah kondisi batasan untuk *end point*, dimana θ^{m+1} , *sub-vector* dari x^{m+1} memenuhi kondisi kritis sinkronisasi yang dijelaskan pada sub bab sebelumnya.

Kondisi batasan persamaan (3.91) dan (3.92) di atas pada metode konvensional menyebabkan akumulasi error μ^k seiring peningkatan nilai k mendekati titik akhir. Sedangkan pada metode yang diusulkan pada tugas akhir ini, penyelesaian persamaan minimalisasi untuk titik akhir yang didefinisikan menghasilkan nilai error μ^k terdistribusikan.

BAB 4

HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

Simulasi dilakukan untuk menunjukkan keakuratan metode yang diusulkan. Pada tugas akhir ini penulis menggunakan dua sistem yakni sistem 3 generator 9 bus Anderson dan Fouad serta 7 generator 57 bus IEEE. Dimana saluran transmisi diasumsikan sebagai *double circuit* dan ada beberapa gangguan yang terjadi. Gangguan yang digunakan pada simulasi yakni gangguan simetri dan asimetri. Gangguan asimetri dimaksudkan untuk menunjukkan kondisi *unbalance*, antara lain gangguan satu fasa ke tanah, gangguan dua fasa ke tanah, gangguan antar fasa. Gangguan asimetri menyebabkan besar arus dan tegangan pada tiap fasa tidak seimbang. Gangguan terjadi diasumsikan pada titik yang sangat dekat dengan bus dan gangguan dihilangkan dengan membuka pemutus daya.

Jenis dan spesifikasi CPU yang digunakan sangat mempengaruhi waktu *running* simulasi. Spesifikasi CPU yang digunakan untuk *running* simulasi pada tugas akhir ini adalah:

System type	: 64-bit Operating System. x64 based processor
Processor	: Intel(R) Core™ i3-2330M CPU @ 2.20GHz (4CPUs), ~2.2GHz
Memmmory	: 2048MB RAM
DirectX Version	: DirectX 11
Operating System	: Windows 8.1 Pro 64-bit (6.3, Build 9600)

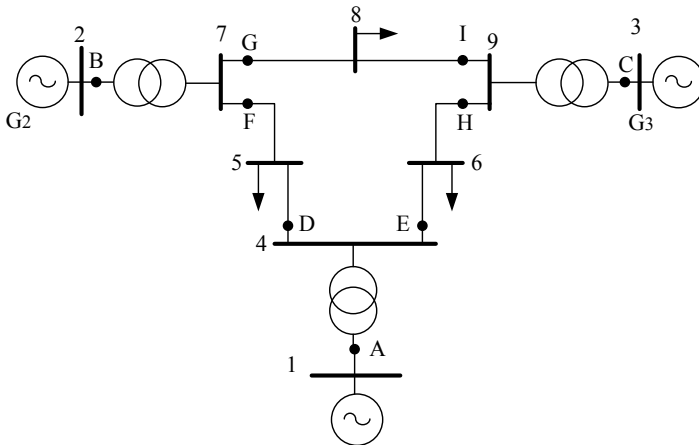
4.1 Perhitungan CCT Sistem 3 generator 9 bus Anderson dan Fouad

Simulasi dilakukan pada sistem 3 generator 9 bus tanpa kontroler namun simulasi dilakukan baik dengan menggunakan *dampner winding* maupun tanpa *dampner winding*. Generator yang berfungsi sebagai *swing/slack* adalah generator 1. Pada simulasi ini digunakan 9 titik gangguan yang dianggap dapat mewakili keseluruhan gangguan yang mungkin terjadi. Kesembilan titik gangguan tersebut dijelaskan sebagai berikut:

- A : titik gangguan antara bus 1 dan bus 4, dekat bus 1
- B : titik gangguan antara bus 2 dan bus 7, dekat bus 2
- C : titik gangguan antara bus 3 dan bus 9, dekat bus 3
- D : titik gangguan antara bus 4 dan bus 5, dekat bus 4
- E : titik gangguan antara bus 7 dan bus 5, dekat bus 7

- F : titik gangguan antara bus 7 dan bus 8, dekat bus 7
- G : titik gangguan antara bus 9 dan bus 6, dekat bus 9
- H : titik gangguan antara bus 9 dan bus 8, dekat bus 9
- I : titik gangguan antara bus 6 dan bus 9, dekat bus 6

Kesepuluh titik gangguan tersebut ditunjukkan oleh gambar berikut:



Gambar 4. 1 Sistem 3 generator 9 bus Anderson dan Fouad

Data impedansi saluran sistem 3 generator 9 bus di atas ditunjukkan pada Tabel 4.2 dan Tabel 4.3. Sedangkan data pembangkit dan beban ditunjukkan pada Tabel 4.4

4.1.1 Parameter Awal dan Tahapan Perhitungan CCT

Parameter-parameter yang perlu diinputkan terlebih dahulu sebelum dilakukan perhitungan CCT, antara lain data sistem seperti impedansi saluran, kapasitas pembangkit dan beban, serta parameter awal yang diperoleh dari aliran daya.

Tabel 4. 1 Data Impedansi Saluran Urutan Positif dan Negatif Sistem 3 Generator 9 Bus Fouad dan Anderson

No. Line	Dari Bus	Menuju Bus	R (p.u.)	X (p.u)	<i>Half Line Charging Susceptance (p.u.)</i>
1	1	4	0,000	0,0576	0,0000
2	2	7	0,0000	0,0625	0,0000
3	3	9	0,0000	0,0586	0,0000
4	4	5	0,0100	0,0850	0,0880
5	4	6	0,0170	0,0920	0,0790
6	5	7	0,0320	0,1610	0,1530
7	6	9	0,0390	0,1700	0,1790
8	7	8	0,0085	0,0720	0,0745
9	8	9	0,0119	0,1008	0,1045

Data impedansi saluran di atas merupakan data impedansi saluran untuk urutan positif dan negatif, impedansi saluran untuk urutan negatif diasumsikan bernilai sama dengan urutan positif. Sedangkan impedansi saluran urutan nol diasumsikan bernilai sepertiga impedansi urutan positif. Nilai resistansi saluran 1, 2 dan 3 bernilai nol dikarenakan pada saluran tersebut terdapat transformator dimana nilai resistansinya diabaikan.

Tabel 4. 2 Data Impedansi Saluran Urutan Nol Sistem 3 Generator 9 Bus Fouad dan Anderson

No. Line	Dari Bus	Menuju Bus	R (p.u)	X (p.u)
1	1	4	0,0000	0,01920
2	2	7	0,0000	0,02083
3	3	9	0,0000	0,01953
4	4	5	0,0100	0,02833
5	4	6	0,0170	0,03067
6	5	7	0,0320	0,05367
7	6	9	0,0390	0,05667
8	7	8	0,0085	0,02400
9	8	9	0,0119	0,03360

Tabel 4. 3 Data Pembangkit dan Beban Sistem 3 Generator 9 Bus Fouad dan Anderson

No. Bus	P Generator (MW)	Q Generator (MVAR)	P Beban (MW)	Q Beban (MVAR)
1	200	0,00	0,00	0,00
2	163	0,00	0,00	0,00
3	85,0	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	125	50
6	0,00	0,00	90	30
7	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,00	100	35
9	0,00	0,00	0,00	0,00

Tahapan awal dalam perhitungan CCT adalah aliran daya sistem untuk memperoleh parameter awal yang akan digunakan pada proses selanjutnya. Hasil yang diperoleh dalam aliran daya antara lain daya mekanis generator, daya generator, tegangan bus generator dan tegangan generator.

Tabel 4. 4 Hasil iterasi aliran daya untuk generator

Gen	Tegangan bus generator (p.u)	Daya Generator (p.u)	Tegangan Terminal Generator (p.u)
1	1,04	$0,7164+j0,2705$	$1,0558+j0,0419$
2	$1,0116+j0,1653$	$1,6300+j0,0665$	$0,9885+j0,3546$
3	$1,0216+j0,0834$	$0,8500-j0,1086$	$0,9902+j0,2316$

Langkah selanjutnya setelah aliran daya adalah reduksi matriks. Reduksi matriks bertujuan menyederhanakan matriks sistem dengan menghilangkan *node* yang tidak diperhitungkan. Arus yang mengalir ke beban bernilai nol sehingga bus beban dapat dihilangkan. Hal ini sama dengan analisa hubung singkat dimana beban statis diabaikan karena tidak ada arus yang mengalir di bus beban. Oleh karena itu hasil dari reduksi matriks tersisa matriks generator yang disebabkan arus kontribusi saat terjadi gangguan hubung singkat hanya berasal dari generator. Pada sistem 3 generator 9 bus, dimensi matriks sistem setelah direduksi adalah berukuran 3x3.

Trajektori kritis dimulai dari lintasan gangguan (*fault on trajectory*) pada CCT hingga titik kritis dimana pada metode yang diusulkan titik kritis yang digunakan adalah saat sistem kehilangan sinkronisasinya. Untuk merepresentasikan trajektori kritis digunakan metode runge kutta orde 4 dan persamaan trapezoidal. Runge kutta orde 4 diperlukan untuk mencari nilai x^0 sebagai penggambaran kondisi *pre fault* dan *on fault*, sedangkan trapezoidal digunakan untuk memperoleh trajektori kritis yakni yang dimulai dari lintasan gangguan saat gangguan dihilangkan pada titik x^0 hingga x^u sebagai titik akhir trajektori kritis.

Setelah diperoleh titik dari x^0 hingga x^u berdasarkan metode trapezoidal, langkah selanjutnya untuk memperoleh trajektori kritis digunakan metode newton raphson. Perhitungan yang dilakukan adalah dengan iterasi menggunakan matriks jacobian metode newton raphson dari nilai inisiasi awal yang diberikan hingga dicapai kondisi konvergen. Dengan ditemukannya trajektori kritis maka waktu pemutus kritis juga ditemukan.

4.1.2 Perhitungan CCT Sistem 3 generator 9 bus Tanpa Damper Winding

Pada tugas akhir ini perhitungan CCT dilakukan dengan mempertimbangkan kondisi *unbalance* yang diakibatkan oleh gangguan asimetri. Oleh karena itu terdapat beberapa gangguan yang akan dianalisa antara lain gangguan satu fasa ke tanah, gangguan dua fasa ke tanah, gangguan antar fasa, serta gangguan simetri berupa gangguan tiga fasa ke tanah. Dengan demikian dapat dibandingkan nilai perhitungan CCT antar gangguan. Simulasi dilakukan pada sistem 3 generator 9 bus baik dengan menggunakan *damper winding* maupun tidak. Pada sub bab ini dilampirkan hasil simulasi perhitungan CCT pada sistem 3 generator 9 bus dengan mengabaikan *damper winding* untuk masing-masing gangguan yang terjadi.

4.1.2.1 Gangguan 1 fasa ke tanah

Gangguan satu fasa ke tanah pada hasil simulasi yang ditunjukkan Tabel 4.5 terjadi pada fasa ke-1. Berdasarkan simulasi yang dilakukan diperoleh beberapa parameter antara lain CCT, lama iterasi serta *error* pada kesembilan titik. Nilai *error* yang diperoleh merupakan perbandingan metode yang diusulkan dengan metode *numerical simulation* atau yang lebih dikenal sebagai TDS (*Time Domain Simulation*).

Tabel 4. 5 Hasil perhitungan nilai CCT sistem 3 generator 9 bus tanpa *damper winding* untuk gangguan 1 fasa ke tanah

Gangguan 1 Fasa ke Tanah (1LG)						
Fault Point	Open Line	Numerical Simulation		Metode yang diusulkan		Error (%)
		CCT (s)	CPU (s)	CCT (s)	CPU (s)	
A	4-1	0,21-0,22	113,57	0,2138	1,357	-
B	2-7	0,2-0,21	112,194	0,2080	1,2194	-
C	3-9	0,21-0,22	113,333	0,2194	1,3333	-
D	4-5	0,22-0,23	115,052	0,2257	1,5052	-
E	4-6	0,22-0,23	113,621	0,2280	1,3621	-
F	7-5	0,21-0,22	113,497	0,2107	1,3497	-
G	7-8	0,21-0,22	114,401	0,2191	1,4401	-
H	9-6	0,21-0,22	113,439	0,2164	1,3439	-
I	9-8	0,22-0,23	116,576	0,2215	1,6576	-

Hasil simulasi di atas dibandingkan antara nilai CCT antara metode yang diusulkan dengan metode simulasi numerik. Pada metode simulasi numerik hasil CCT yang diperoleh berupa rentang nilai antara kondisi stabil dan tidak stabil sedangkan pada metode yang diusulkan nilai CCT langsung diperoleh. Dengan demikian dapat dihitung prosentase kesalahan pada setiap titik gangguan.

Berdasarkan Tabel 4.5 di atas diperoleh nilai CCT pada setiap titik gangguan berbeda-beda dan semua nilai CCT pada setiap titik sesuai dengan hasil metode simulasi numerik. Misalkan pada titik A diperoleh CCT sebesar 0.2205 detik dengan simulasi menggunakan metode yang diusulkan. Sedangkan pada simulasi numerik untuk titik gangguan A *range* CCT adalah 0.21-0.22 detik yang berarti bahwa sistem stabil saat pemutus daya bekerja setelah 0.21 detik dan sistem tidak stabil saat pemutus daya bekerja setelah 0.22 detik. Hal ini menunjukkan nilai CCT berdasarkan metode yang diusulkan berada dalam *range* CCT simulasi numerik.

Perhitungan *error* diperoleh dengan persamaan berikut:

$$error = \frac{\text{nilai cct} - \text{tcu atau tcs}}{\text{tcu atau tcs}} \quad (4.1)$$

Dimana t_{cu} atau t_{cs} merupakan *range* CCT yang diperoleh dari metode simulasi numerik, dengan t_{cu} merupakan batas waktu *unstable* dan t_{cs} merupakan batas waktu *stable*. Besar nilai *error* yang diizinkan untuk simulasi adalah dibawah 5%. Hasil simulasi yang diperoleh tidak terdapat *error* sehingga setting CCT aman untuk diterapkan.

Waktu yang diperlukan untuk simulasi (*CPU time*) tergantung pada spesifikasi komputer yang digunakan. Pada metode konvensional simulasi numerik dilakukan *trial* dan *error* untuk memperoleh nilai *range* CCT stabil dan tidak stabil untuk tiap gangguan. Diasumsikan bahwa terdapat 10 kali percobaan untuk masing-masing titik gangguan dengan waktu yang diperlukan untuk masing-masing percobaan 10 detik ditambah waktu untuk *running* programnya. Sedangkan pada metode yang diusulkan nilai CCT langsung diperoleh dari *running* program karena termasuk *direct method*. Perumusan waktu simulasi untuk metode simulasi numerik adalah:

$$CPU(s) = 10 \times (10 + \text{waktu running program}) \quad (4.2)$$

Pada setiap titik gangguan terdapat 3 jenis grafik yakni grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad*, grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (t) dalam detik, serta grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (t) dalam detik. Grafik yang ditampilkan adalah pada 2 titik gangguan D dan H yang dianggap mewakili keseluruhan titik.

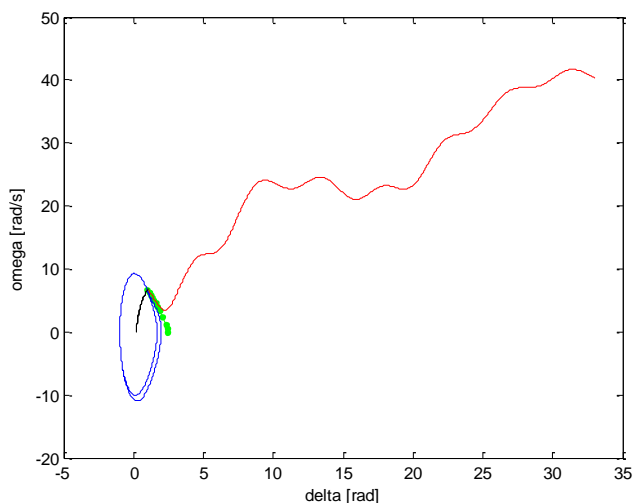
Pada grafik pertama karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* yang ditampilkan terdapat tiga warna kurva yang digunakan yakni biru, merah dan hijau. Kurva warna biru menunjukkan kondisi stabil saat gangguan dihilangkan sebelum CCT, warna merah menunjukkan kondisi tidak stabil saat gangguan dihilangkan setelah CCT dan warna hijau menunjukkan *critical trajectory* yang diperoleh dengan menggunakan metode yang diusulkan. Kurva hijau yang mewakili *critical trajectory* berada di antara kurva stabil dan tidak stabil hasil simulasi TDS. Pada Gambar 4.2 menunjukkan bahwa saat kondisi stabil rotor berosilasi pada titik SEP (*Stable Equilibrium Point*) sedangkan saat kondisi tidak stabil yang ditunjukkan kurva merah kecepatan sudut rotor meningkat seiring pergeseran sudut rotor yang semakin besar. Peningkatan kecepatan sudut rotor secara terus menerus menyebabkan generator kehilangan sinkronisasinya.

Grafik kedua dan ketiga yang ditunjukkan pada Gambar 4.3 dan Gambar 4.4 terdapat empat warna yakni merah, biru, hijau dan cyan.

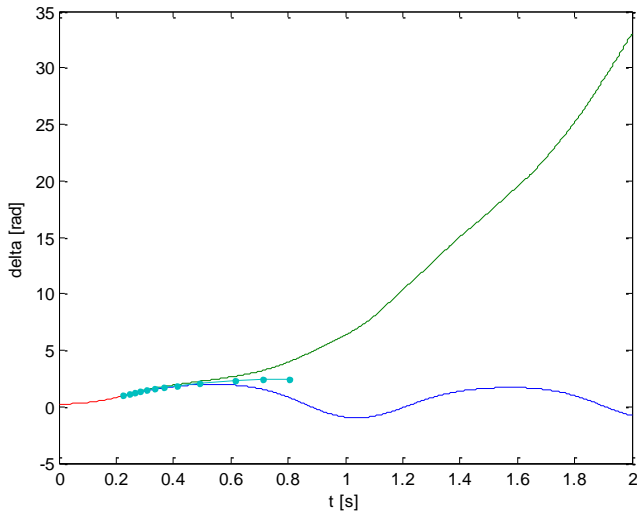
Kurva biru mewakili kondisi stabil, kurva merah mewakili lintasan gangguan (*fault on*), kurva hijau mewakili kondisi tidak stabil serta kurva cyan mewakili *critical generator*. Pada Gambar 4.3 yakni grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (t) dalam detik, besar sudut rotor (delta) untuk kondisi stabil beresilasi pada nilai sekitar 0 rad sedangkan untuk kondisi tidak stabil sudut rotor (delta) meningkat seiring meningkatnya waktu dalam detik. Begitu pula pada Gambar 4.4 yakni grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (t) dalam detik, kecepatan sudut rotor pada kondisi stabil beresilasi pada nilai sekitar 0 *rad/s* sedangkan pada kondisi tidak stabil kecepatan sudut rotor meningkat terus menerus seiring pertambahan waktu.

a. Titik gangguan D

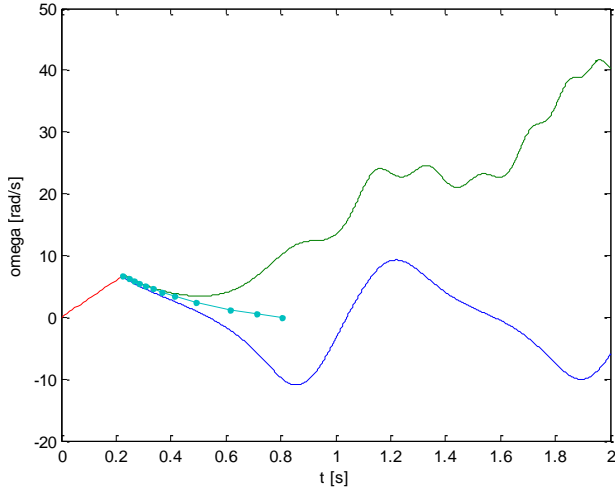
Saat gangguan di titik D yang terletak pada saluran antara bus 4-5 nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,2257 detik, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode simulasi numerik adalah dalam *range* 0,22-0,23 detik.



Gambar 4. 2 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *damper winding* bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan D



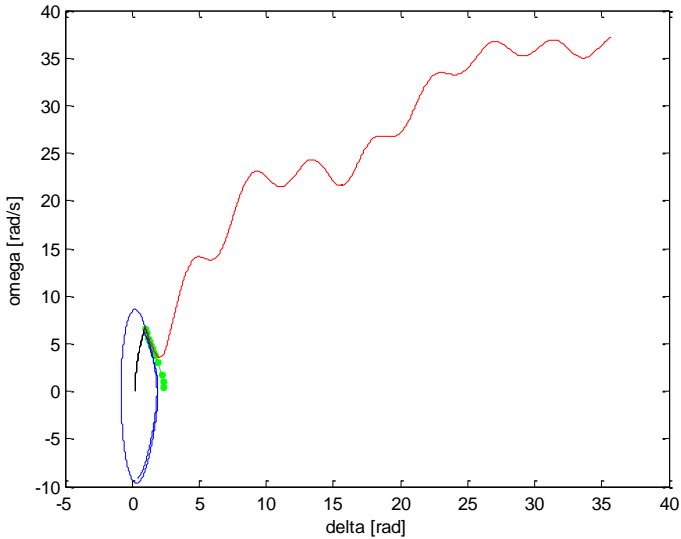
Gambar 4. 3 Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *dampers winding* bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan D



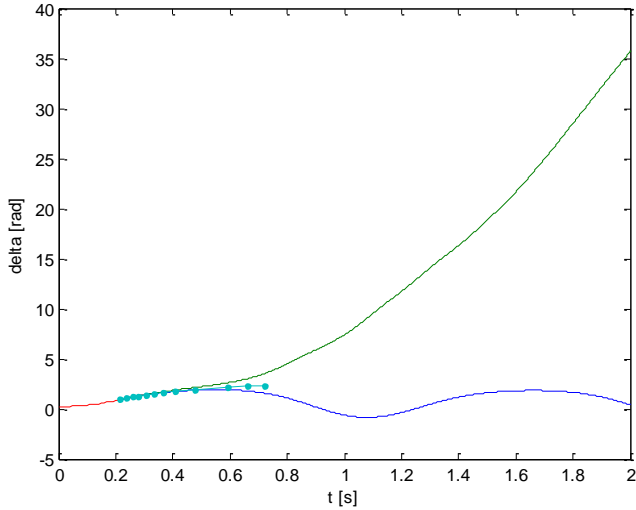
Gambar 4. 4 Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *dampers winding* bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan D

b. Titik gangguan H

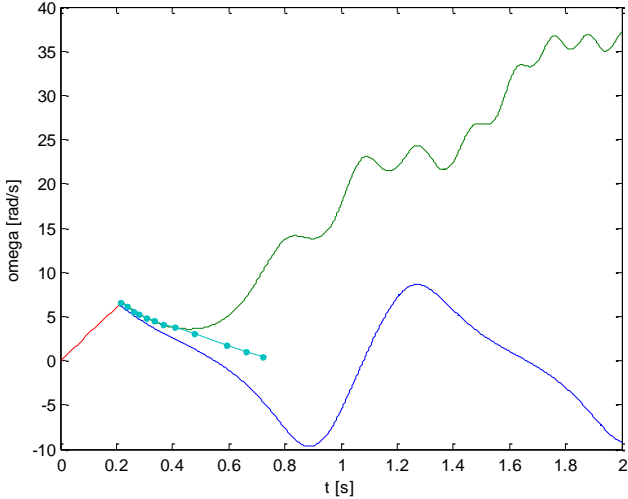
Saat gangguan di titik H yang terletak pada saluran antara bus 9-6 nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,2164 detik, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode simulasi numerik adalah dalam *range* 0,21-0,22 detik.



Gambar 4. 5 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *damper winding* bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan H



Gambar 4. 6 Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *dampers winding* bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan H



Gambar 4. 7 Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *dampers winding* bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan H

4.1.2.2 Gangguan 2 fasa ke tanah

Gangguan dua fasa ke tanah pada hasil simulasi yang ditunjukkan Tabel 4.6 terjadi pada fasa 1 ke fasa 2. Berdasarkan simulasi yang dilakukan diperoleh beberapa parameter antara lain CCT, lama iterasi serta *error* pada kesembilan titik. Nilai *error* yang diperoleh merupakan perbandingan metode yang diusulkan dengan metode *numerical simulation* atau yang lebih dikenal sebagai TDS (*Time Domain Simulation*).

Tabel 4. 6 Hasil perhitungan nilai CCT sistem 3 generator 9 bus tanpa *dampers* untuk gangguan 2 fasa ke tanah

Gangguan 2 Fasa ke Tanah (2LG)						
Fault Point	Open Line	Numerical Simulation		Metode yang diusulkan		Error (%)
		CCT(s)	CPU (s)	CCT(s)	CPU (s)	
A	4-1	0,21-0,22	112,711	0,2196	1,2711	-
B	2-7	0,20-0,21	112,567	0,2078	1,2567	-
C	3-9	0,21-0,22	112,356	0,2167	1,2356	-
D	4-5	0,22-0,23	112,742	0,2254	1,2742	-
E	4-6	0,22-0,23	111,842	0,2279	1,1842	-
F	7-5	0,20-0,21	113,39	0,2099	1,339	-
G	7-8	0,21-0,22	113,901	0,2152	1,3901	-
H	9-6	0,21-0,22	111,926	0,2161	1,1926	-
I	9-8	0,22-0,23	112,859	0,2236	1,2859	-

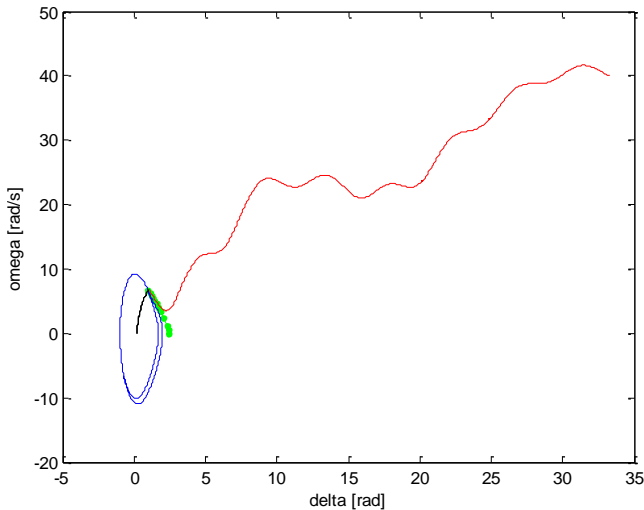
Hasil simulasi di atas dibandingkan antara nilai CCT antara metode yang diusulkan dengan metode simulasi numerik. Pada metode simulasi numerik hasil CCT yang diperoleh berupa rentang nilai antara kondisi stabil dan tidak stabil sedangkan pada metode yang diusulkan nilai CCT langsung diperoleh. Berdasarkan tabel di atas tidak terdapat *error* antara metode yang diusulkan dengan metode simulasi numerik. Sedangkan perhitungan waktu simulasi untuk metode TDS menggunakan persamaan (4.2). Waktu simulasi metode konvensional TDS lebih lama dikarenakan metode ini dilakukan dengan cara *trial and error* sedangkan pada metode yang diusulkan jauh lebih cepat karena merupakan *direct method*.

Berikut ini dilampirkan grafik pada tiga titik gangguan seperti sub bab gangguan satu fasa sebelumnya. Pada grafik kecepatan sudut rotor terhadap sudut rotor yang ditampilkan terdapat tiga warna kurva yang digunakan yakni biru, merah dan hijau. Kurva warna biru menunjukkan kondisi stabil saat gangguan dihilangkan sebelum CCT, warna merah

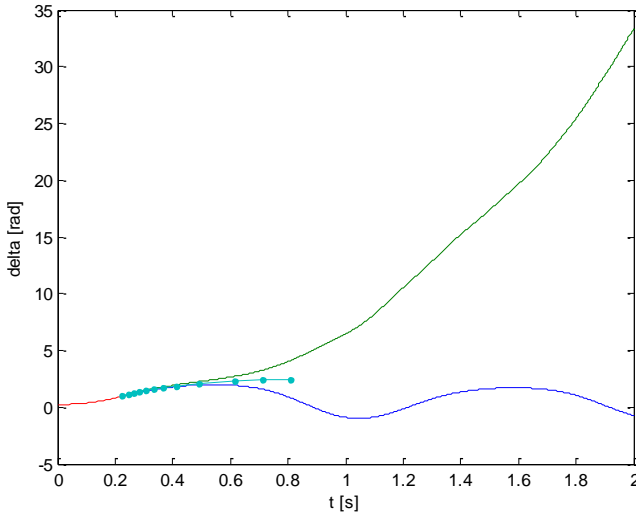
menunjukkan kondisi tidak stabil saat gangguan dihilangkan setelah CCT dan warna hijau menunjukkan *critical trajectory* yang diperoleh dengan menggunakan metode yang diusulkan. Sedangkan pada grafik kecepatan sudut rotor terhadap waktu dan grafik sudut rotor terhadap waktu terdapat empat warna kurva yang digunakan yakni biru, merah, hijau dan cyan. Kurva biru menunjukkan kondisi stabil, kurva merah menunjukkan lintasan gangguan, kurva hijau menunjukkan kondisi tidak stabil, kurva cyan menunjukkan *critical trajectory*.

a. Titik gangguan D

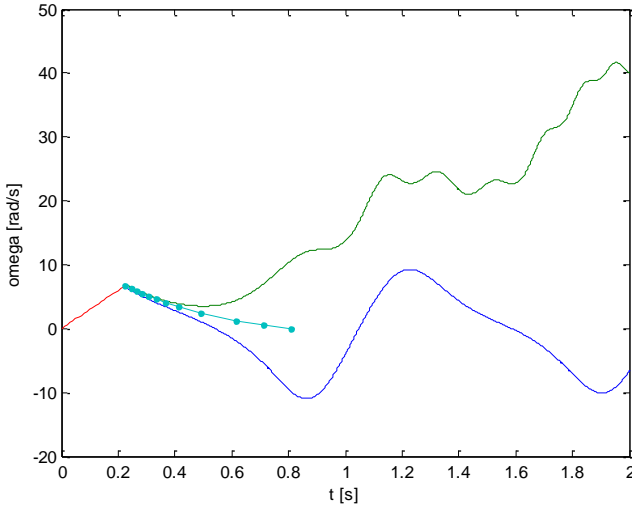
Saat gangguan di titik D yang terletak pada saluran antara bus 4-5 nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,2254 detik, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode simulasi numerik adalah dalam range 0,22-0,23 detik.



Gambar 4. 8 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *dampers winding* bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan D



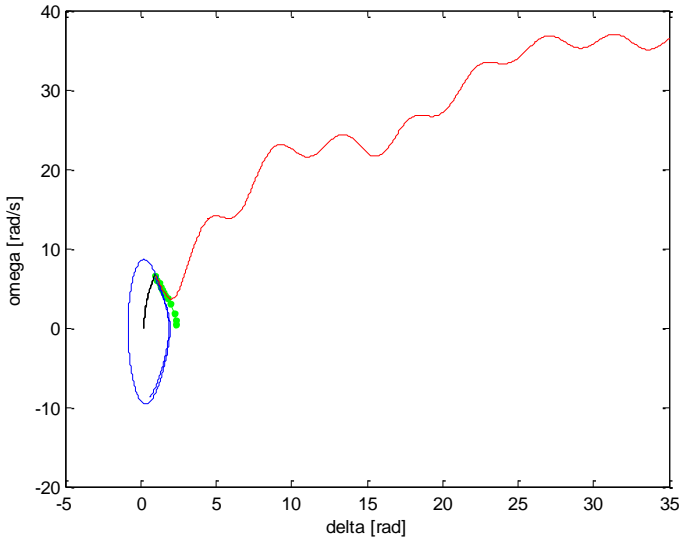
Gambar 4. 9 Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *damper winding* bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan D



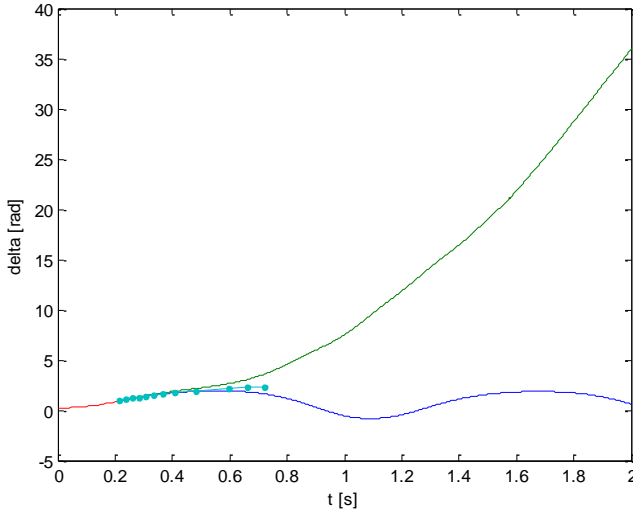
Gambar 4. 10 Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *damper winding* bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan D

b. Titik gangguan H

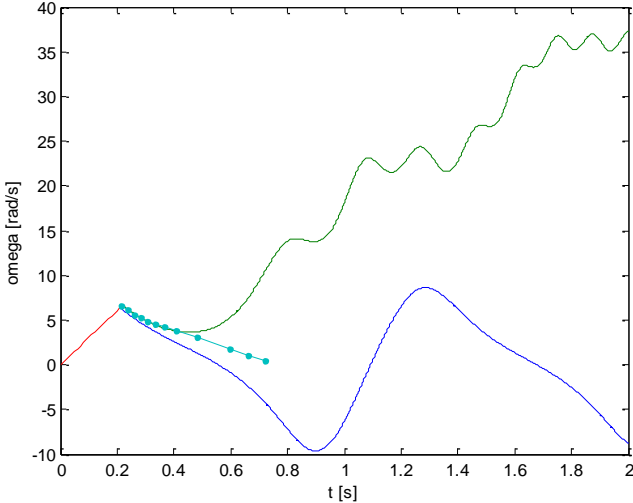
Saat gangguan di titik H yang terletak pada saluran antara bus 9-6 nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,2161 detik, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode simulasi numerik adalah dalam *range* 0,21-0,22 detik.



Gambar 4. 11 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *damper winding* bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan H



Gambar 4. 12 Grafik sudut rotor (δ) dalam rad terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *dampers winding* bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan H



Gambar 4. 13 Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *dampers winding* bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan H

4.1.2.3 Gangguan 3 fasa ke tanah

Gangguan tiga fasa ke tanah pada hasil simulasi yang ditunjukkan Tabel 4.7 terjadi pada ketiga fasa. Berdasarkan simulasi yang dilakukan diperoleh beberapa parameter antara lain CCT, lama iterasi serta *error* pada kesembilan titik. Nilai *error* yang diperoleh merupakan perbandingan metode yang diusulkan dengan metode *numerical simulation* atau yang lebih dikenal sebagai TDS (*Time Domain Simulation*).

Tabel 4. 7 Hasil perhitungan nilai CCT sistem 3 generator 9 bus tanpa *damper winding* untuk gangguan 3 fasa ke tanah

Gangguan 3 Fasa ke Tanah (3LG)						
Fault Point	Open Line	Numerical Simulation		Metode yang diusulkan		Error (%)
		CCT (s)	CPU (s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	4-1	0,21-0,22	113,104	0,2198	1,3104	-
B	2-7	0,21-0,22	112,187	0,2178	1,2187	-
C	3-9	0,22-0,23	112,258	0,2252	1,2258	-
D	4-5	0,22-0,23	113,447	0,2256	1,3447	-
E	4-6	0,22-0,23	112,958	0,2281	1,2958	-
F	7-5	0,21-0,22	112,975	0,2110	1,2975	-
G	7-8	0,21-0,22	113,94	0,2192	1,394	-
H	9-6	0,21-0,22	112,737	0,2166	1,2737	-
I	9-8	0,22-0,23	115,229	0,2206	1,5229	-

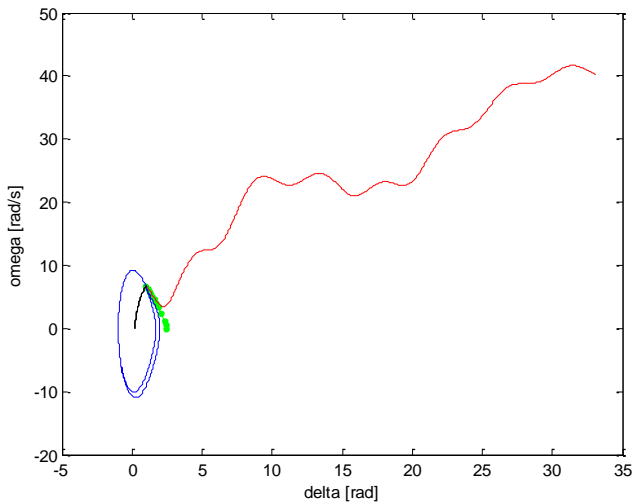
Pada tabel di atas ditampilkan perbandingan antara hasil simulasi dengan menggunakan metode konvensional yakni TDS dan dengan metode yang diusulkan. Metode simulasi numerik menghasilkan CCT dalam *range* nilai stabil dan tidak stabil sedangkan metode yang diusulkan menghasilkan nilai CCT secara langsung. Nilai CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan pada semua titik berada dalam *range* CCT metode TDS sehingga tidak terdapat *error* dan CCT dapat diterapkan. Sedangkan CPU *time* atau waktu simulasi metode simulasi numerik diperoleh berdasarkan persamaan (4.2) dan untuk metode yang diusulkan diperoleh dari waktu waktu *running* program karena termasuk *direct method*.

Berikut ini dilampirkan grafik pada tiga titik gangguan seperti sub bab sebelumnya. Pada grafik kecepatan sudut rotor terhadap sudut rotor yang ditampilkan terdapat tiga warna kurva yang digunakan yakni biru, merah dan hijau. Kurva warna biru menunjukkan kondisi stabil, warna

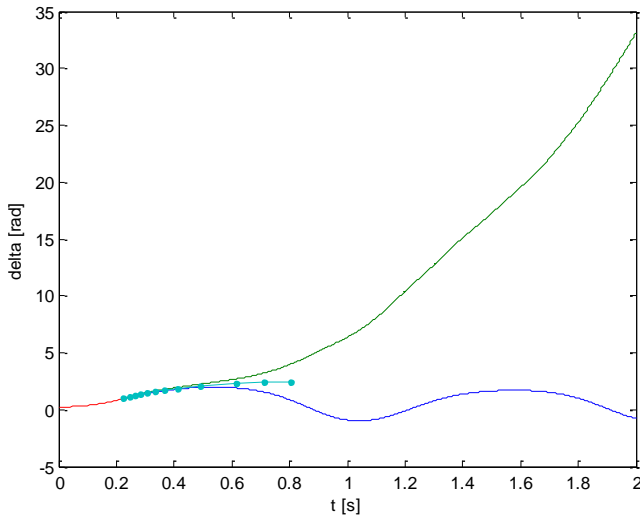
merah menunjukkan kondisi tidak stabil dan warna hijau menunjukkan *critical trajectory* yang diperoleh dengan menggunakan metode yang diusulkan. Sedangkan pada grafik kecepatan sudut rotor terhadap waktu dan grafik sudut rotor terhadap waktu terdapat empat warna kurva yang digunakan yakni biru, merah, hijau dan cyan. Kurva biru menunjukkan kondisi stabil, kurva merah menunjukkan lintasan gangguan, kurva hijau menunjukkan kondisi tidak stabil, kurva cyan menunjukkan *critical trajectory*.

a. Titik gangguan D

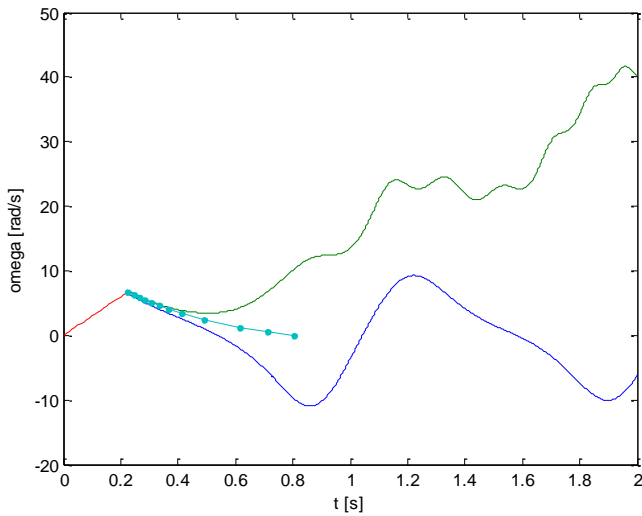
Saat gangguan di titik D yang terletak pada saluran antara bus 4-5 nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,2256 detik, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode simulasi numerik adalah dalam range 0,22-0,23 detik.



Gambar 4. 14 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *damper winding* bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan D



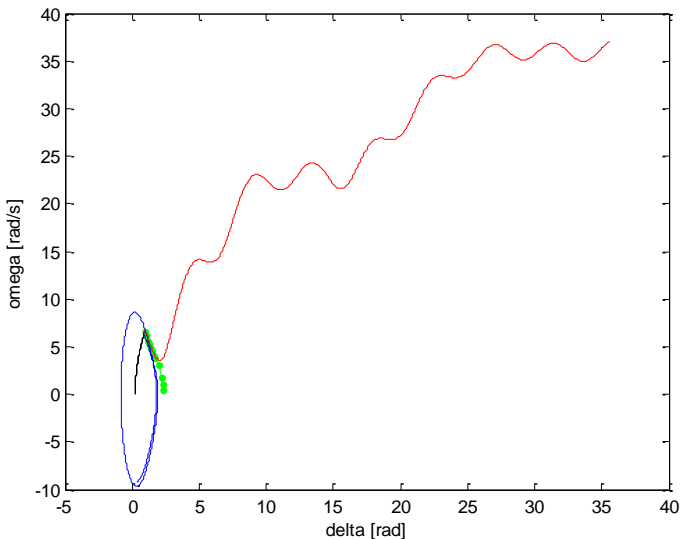
Gambar 4. 15 Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *damper winding* bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan D



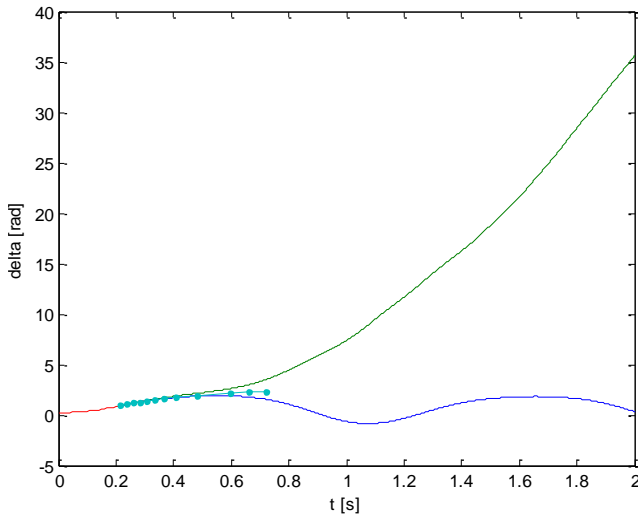
Gambar 4. 16 Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *damper winding* bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan D

b. Titik gangguan H

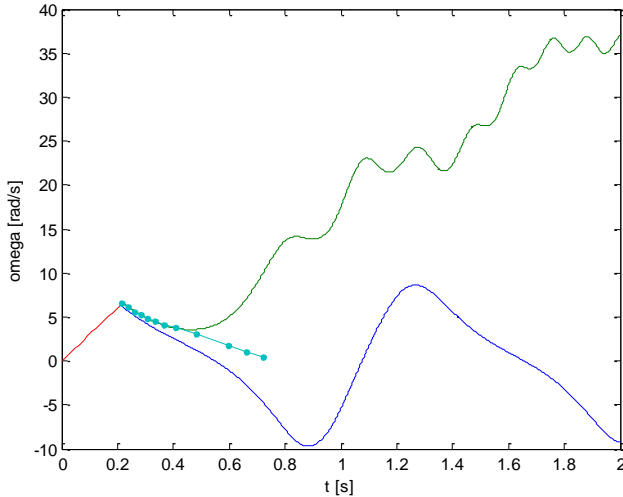
Saat gangguan di titik H yang terletak pada saluran antara bus 9-6 nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,2166 detik, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode simulasi numerik adalah dalam *range* 0,21-0,22 detik.



Gambar 4. 17 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *damper winding* bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan H



Gambar 4. 18 Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *damper winding* bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan H



Gambar 4. 19 Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *damper winding* bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan H

4.1.2.4 Gangguan fasa ke fasa (line to line)

Gangguan fasa ke fasa pada hasil simulasi yang ditunjukkan Tabel 4.8 terjadi pada fasa 1 ke fasa 2. Berdasarkan simulasi yang dilakukan diperoleh beberapa parameter antara lain CCT, lama iterasi serta *error* pada kesembilan titik. Nilai *error* yang diperoleh merupakan perbandingan metode yang diusulkan dengan metode *numerical simulation* atau yang lebih dikenal sebagai TDS (*Time Domain Simulation*).

Tabel 4. 8 Hasil perhitungan nilai CCT sistem 3 generator 9 bus tanpa *damper winding* untuk gangguan *line to line*

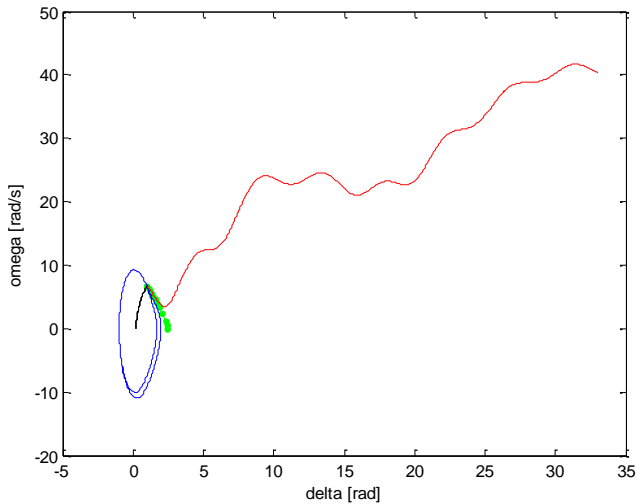
Gangguan Antar Fasa (2LL)						
Fault Point	Open Line	Numerical simulation		Metode yang diusulkan		Error (%)
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	4-1	0,21-0,22	113,482	0,2171	1,3482	-
B	2-7	0,20-0,21	112,374	0,2018	1,2374	-
C	3-9	0,21-0,22	113,904	0,2194	1,3904	-
D	4-5	0,22-0,23	113,777	0,2257	1,3777	-
E	4-6	0,22-0,23	112,51	0,2280	1,251	-
F	7-5	0,21-0,22	113,033	0,2109	1,3033	-
G	7-8	0,21-0,22	115,737	0,2154	1,5737	-
H	9-6	0,21-0,22	112,988	0,2152	1,2988	-
I	9-8	0,22-0,23	115,754	0,2213	1,5754	-

Hasil simulasi di atas dibandingkan antara nilai CCT antara metode yang diusulkan dengan metode simulasi numerik. Pada metode simulasi numerik hasil CCT yang diperoleh berupa rentang nilai antara kondisi stabil dan tidak stabil sedangkan pada metode yang diusulkan nilai CCT langsung diperoleh. Berdasarkan perbandingan metode yang diusulkan dengan metode simulasi numerik tidak terdapat *error* sehingga setting CCT. Waktu simulasi metode konvensional TDS lebih lama dikarenakan metode ini dilakukan dengan cara *trial and error* sedangkan pada metode yang diusulkan jauh lebih cepat karena merupakan *direct method*.

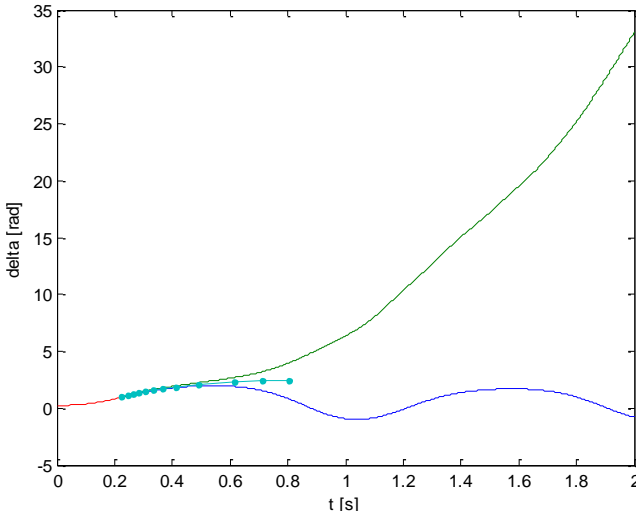
Berikut ini dilampirkan 3 grafik pada titik-titik gangguan seperti sub bab sebelumnya. Pada setiap grafik yang ditampilkan terdapat tiga warna kurva yang digunakan yakni biru, merah dan hijau. Kurva warna biru menunjukkan kondisi stabil saat gangguan dihilangkan sebelum CCT, warna merah menunjukkan kondisi tidak stabil saat gangguan dihilangkan setelah CCT dan warna hijau menunjukkan *critical trajectory* yang diperoleh dengan menggunakan metode yang diusulkan.

a. Titik gangguan D

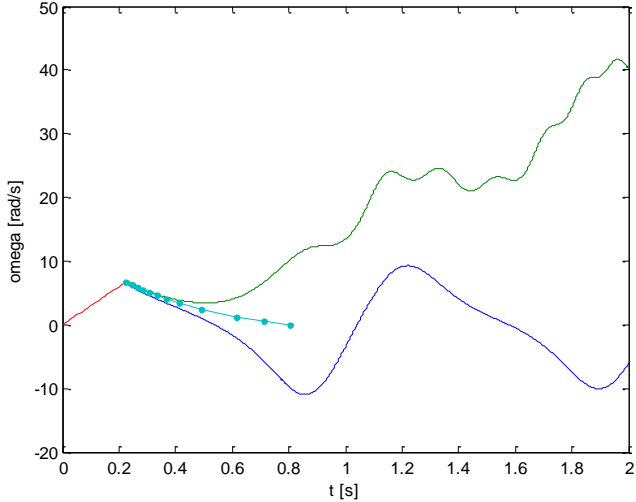
Saat gangguan di titik D yang terletak pada saluran antara bus 4-5 nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,2257 detik, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode simulasi numerik adalah dalam *range* 0,22-0,23 detik.



Gambar 4. 20 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *damper winding* bila mengalami gangguan fasa ke fasa pada titik gangguan D



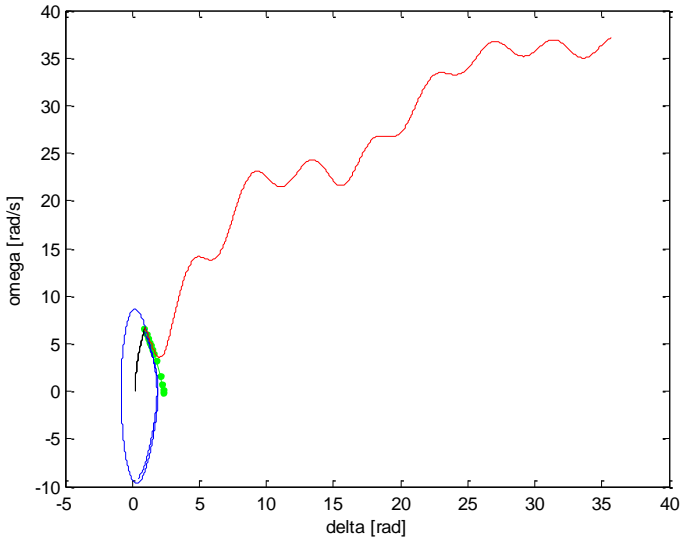
Gambar 4. 21 Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *dampers winding* bila mengalami gangguan fasa ke fasa pada titik gangguan D



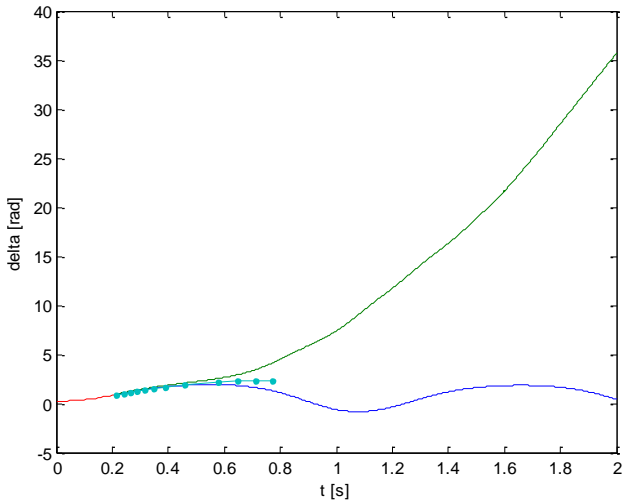
Gambar 4. 22 Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *dampers winding* bila mengalami gangguan fasa ke fasa pada titik gangguan D

b. Titik gangguan H

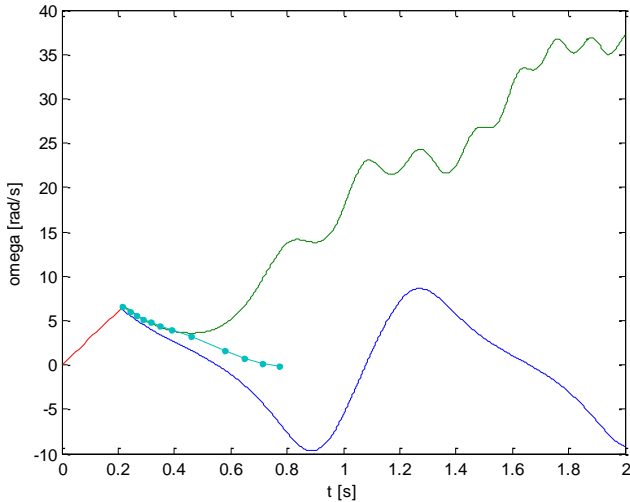
Saat gangguan di titik H yang terletak pada saluran antara bus 9-6 nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,2152 detik, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode simulasi numerik adalah dalam *range* 0,21-0,22 detik.



Gambar 4. 23 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *damper winding* bila mengalami gangguan fasa ke fasa pada titik gangguan H



Gambar 4. 24 Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (*t*) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *damper winding* bila mengalami gangguan fasa ke fasa pada titik gangguan H



Gambar 4. 25 Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (*t*) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *damper winding* bila mengalami gangguan fasa ke fasa pada titik gangguan H

4.1.3 Perhitungan CCT Sistem 3 generator 9 bus Menggunakan *Damper Winding*

Pada sub bab sebelumnya telah dilampirkan hasil simulasi sistem 3 generator 9 bus tanpa menggunakan *damper winding*. Oleh karena itu, untuk membandingkan perhitungan CCT metode yang diusulkan, pada sub bab ini dilampirkan hasil simulasi sistem 3 generator 9 bus dengan menggunakan *damper winding*. Besar nilai koefisien *damper winding* yang digunakan 0,05 p.u. Fungsi utama *damper winding* pada mesin sinkron adalah meredam osilasi mekanis sehingga meningkatkan kestabilan sistem. Hal ini ditunjukkan pada hasil simulasi yang menunjukkan nilai CCT pada sistem dengan menggunakan *damper winding* memiliki nilai yang lebih besar jika dibandingkan dengan sistem tanpa *damper winding*. Nilai CCT yang lebih besar menunjukkan bahwa waktu kritis untuk memutus gangguan dapat lebih lama dikarenakan sistem lebih stabil dibandingkan tanpa *damper winding* saat terkena gangguan transien.

4.1.3.1 Gangguan 1 fasa ke tanah

Gangguan satu fasa ke tanah pada hasil simulasi yang ditunjukkan Tabel 4.9 terjadi pada fasa ke-1. Berdasarkan simulasi yang dilakukan diperoleh beberapa parameter antara lain CCT, lama iterasi serta *error* pada kesembilan titik. Nilai *error* yang diperoleh merupakan perbandingan metode yang diusulkan dengan metode *numerical simulation* atau yang lebih dikenal sebagai TDS (*Time Domain Simulation*).

Tabel 4. 9 Hasil perhitungan nilai CCT sistem 3 generator 9 bus menggunakan *damper winding* untuk gangguan 1 fasa ke tanah

Gangguan 1 Fasa ke Tanah (1LG)						
Fault Point	Open Line	Numerical Simulation		Metode yang diusulkan		Error (%)
		CCT (s)	CPU (s)	CCT	CPU (s)	
A	4-1	0,25-0,26	113,259	0,2582	1,3259	-
B	2-7	0,24-0,25	113,666	0,2472	1,3666	-
C	3-9	0,25-0,26	116,204	0,2536	1,6204	-
D	4-5	0,26-0,27	113,999	0,2606	1,3999	-
E	4-6	0,26-0,27	113,578	0,2639	1,3578	-
F	7-5	0,24-0,25	113,887	0,2464	1,3887	-
G	7-8	0,25-0,26	114,183	0,2532	1,4183	-
H	9-6	0,24-0,25	115,406	0,2472	1,5406	-
I	9-8	0,25-0,26	114,503	0,2576	1,4503	-

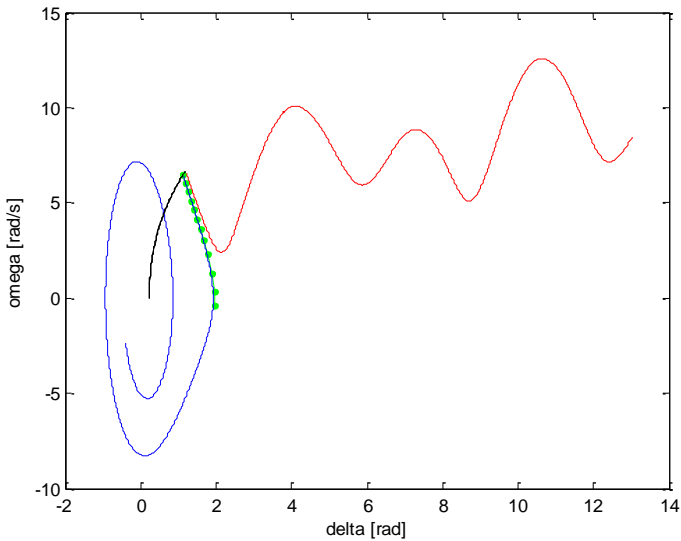
Hasil simulasi di atas dibandingkan antara nilai CCT antara metode yang diusulkan dengan metode simulasi numerik. Pada metode simulasi numerik hasil CCT yang diperoleh berupa rentang nilai antara kondisi stabil dan tidak stabil sedangkan pada metode yang diusulkan nilai CCT langsung diperoleh. Dengan demikian dapat dihitung prosentase kesalahan pada setiap titik gangguan. Berdasarkan hasil simulasi tidak terdapat *error* saat dibandingkan nilai CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan dengan metode simulasi numerik.

Dibandingkan dengan nilai CCT yang diperoleh pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *damper winding* yakni sekitar 0,21-0,22 nilai CCT pada sistem dengan menggunakan *damper winding* bernilai lebih besar yakni sekitar 0,25-0,26 detik. Hal ini menunjukkan bahwa dengan penambahan *damper winding* menyebabkan sistem lebih stabil sehingga waktu pemutus kritis generator bernilai lebih besar. Nilai waktu pemutus yang lebih besar ini dikarenakan sistem lebih mampu menahan gangguan transien selama sekian detik akibat adanya kumparan peredam.

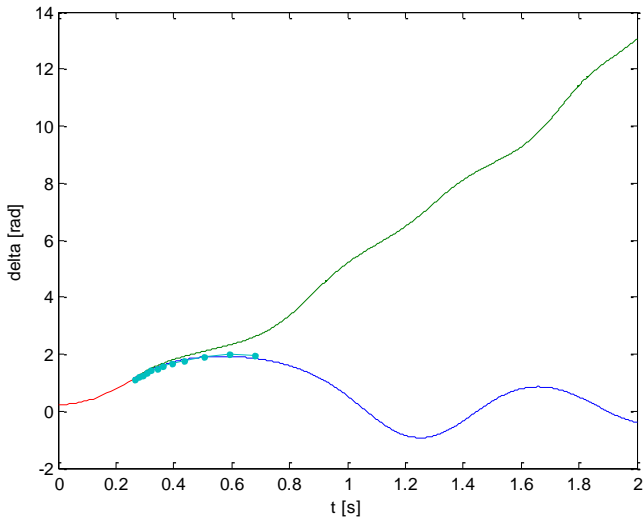
Berikut ini dilampirkan 3 jenis grafik pada beberapa titik gangguan seperti sub bab sebelumnya. Grafik yang ditampilkan adalah pada 2 titik gangguan D dan F yang dianggap mewakili keseluruhan titik. Pada grafik kecepatan sudut rotor terhadap sudut rotor yang ditampilkan terdapat tiga warna kurva yang digunakan yakni biru, merah dan hijau. Kurva warna biru menunjukkan kondisi stabil, warna merah menunjukkan kondisi tidak stabil dan warna hijau menunjukkan *critical trajectory* yang diperoleh dengan menggunakan metode yang diusulkan. Sedangkan pada grafik kecepatan sudut rotor terhadap waktu dan grafik sudut rotor terhadap waktu terdapat empat warna kurva yang digunakan yakni biru, merah, hijau dan cyan. Kurva biru menunjukkan kondisi stabil, kurva merah menunjukkan lintasan gangguan, kurva hijau menunjukkan kondisi tidak stabil, kurva cyan menunjukkan *critical trajectory*.

a. Titik gangguan D

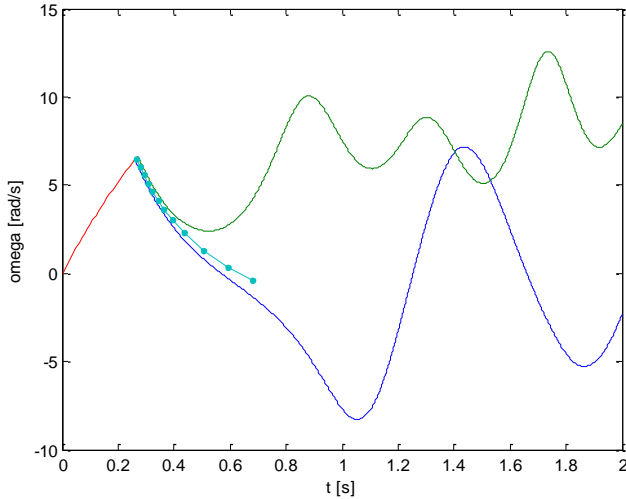
Saat gangguan di titik D yang terletak pada saluran antara bus 4-5 nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,2606 detik, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode simulasi numerik adalah dalam *range* 0,26-0,27 detik.



Gambar 4. 26 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan *damper winding* bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan C



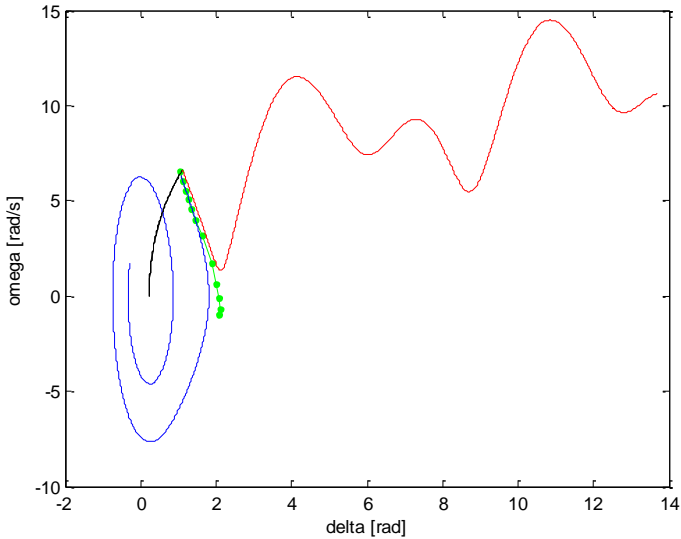
Gambar 4. 27 Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan *dampner winding* bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan D



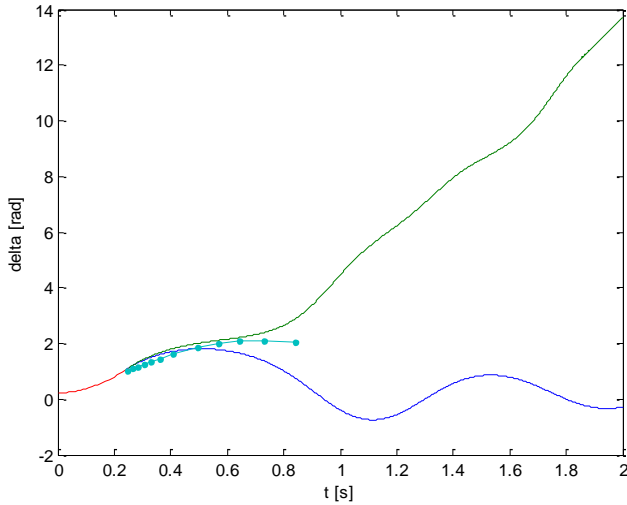
Gambar 4. 28 Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan *dampner winding* bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan D

b. Titik gangguan F

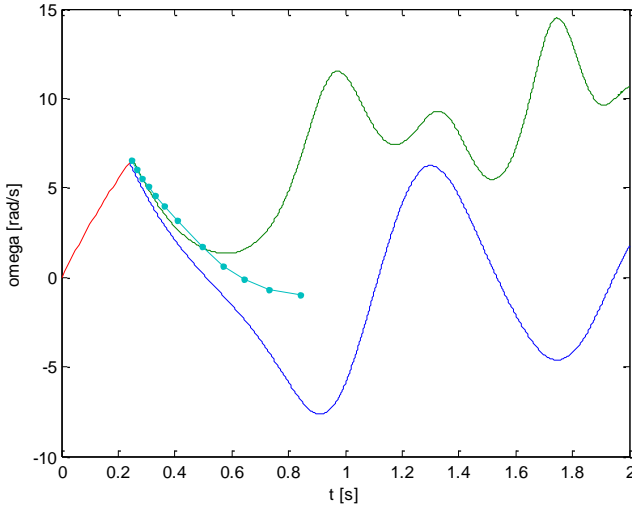
Saat gangguan di titik F yang terletak pada saluran antara bus 7-5 nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,2464 detik, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode simulasi numerik adalah dalam *range* 0,24-0,25 detik.



Gambar 4. 29 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan *damper winding* bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan F



Gambar 4. 30 Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan *dampner winding* bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan F



Gambar 4. 31 Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan *dampner winding* bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan F

4.1.3.2 Gangguan 2 fasa ke tanah

Gangguan dua fasa ke tanah pada hasil simulasi yang ditunjukkan Tabel 4.10 terjadi pada fasa 1 ke fasa 2. Berdasarkan simulasi yang dilakukan diperoleh beberapa parameter antara lain CCT, lama iterasi serta *error* pada kesembilan titik. Nilai *error* yang diperoleh merupakan perbandingan metode yang diusulkan dengan metode *numerical simulation* atau yang lebih dikenal sebagai TDS (*Time Domain Simulation*).

Tabel 4. 10 Hasil perhitungan nilai CCT sistem 3 generator 9 bus menggunakan *damper winding* untuk gangguan 2 fasa ke tanah

Gangguan 2 Fasa ke Tanah (2LG)						
Fault Point	Open Line	Numerical Simulation		Metode yang diusulkan		Error (%)
		CCT (s)	CPU (s)	CCT(s)	CPU (s)	
A	4-1	0,25-0,26	114,321	0,2532	1,4321	-
B	2-7	0,25-0,26	115,408	0,2417	1,5408	-
C	3-9	0,25-0,26	114,259	0,2535	1,4259	-
D	4-5	0,26-0,27	114,1	0,2603	1,41	-
E	4-6	0,26-0,27	116,494	0,2631	1,6494	-
F	7-5	0,24-0,25	112,447	0,2447	1,2447	-
G	7-8	0,25-0,26	114,598	0,2539	1,4598	-
H	9-6	0,24-0,25	116,874	0,2466	1,6874	-
I	9-8	0,25-0,26	114,468	0,2583	1,4468	-

Pada tabel di atas ditampilkan perbandingan antara hasil simulasi dengan menggunakan metode konvensional yakni TDS dan dengan metode yang diusulkan. Metode simulasi numerik menghasilkan CCT dalam *range* nilai stabil dan tidak stabil sedangkan metode yang diusulkan menghasilkan nilai CCT secara langsung. Nilai CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan pada semua titik berada dalam *range* CCT metode TDS sehingga tidak terdapat *error* dan CCT dapat diterapkan. Sedangkan CPU *time* atau waktu simulasi metode simulasi numerik diperoleh berdasarkan persamaan (4.2) dan untuk metode yang diusulkan diperoleh dari waktu waktu *running* program karena termasuk *direct method*.

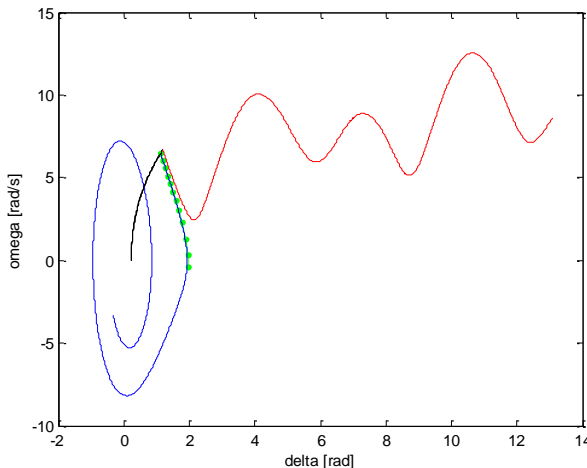
Dibandingkan dengan nilai CCT yang diperoleh pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *damper winding*, nilai CCT pada sistem dengan menggunakan *damper winding* bernilai lebih besar. Hal ini menunjukkan bahwa dengan penambahan *damper winding* menyebabkan sistem lebih

stabil sehingga waktu pemutus kritis generator bernilai lebih besar. Nilai waktu pemutus yang lebih besar ini dikarenakan sistem lebih mampu menahan gangguan transien selama sekian detik akibat adanya kumparan peredam.

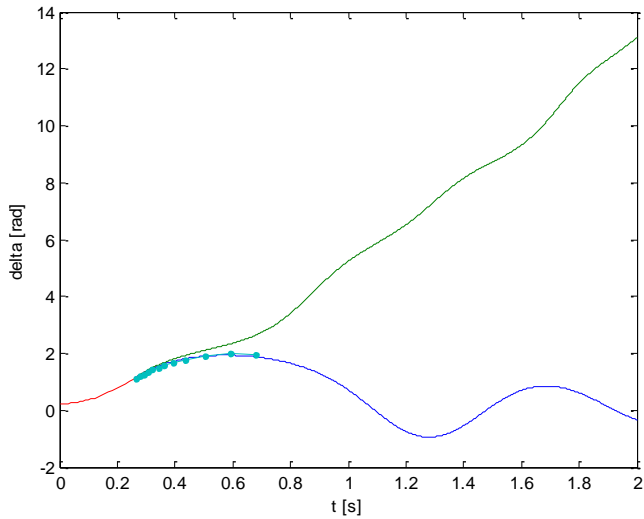
Grafik yang ditampilkan adalah pada 2 titik gangguan D dan F. Pada grafik kecepatan sudut rotor terhadap sudut rotor yang ditampilkan terdapat tiga warna kurva yang digunakan yakni biru, merah dan hijau. Kurva warna biru menunjukkan kondisi stabil, warna merah menunjukkan kondisi tidak stabil dan warna hijau menunjukkan *critical trajectory* yang diperoleh dengan menggunakan metode yang diusulkan. Sedangkan pada grafik kecepatan sudut rotor terhadap waktu dan grafik sudut rotor terhadap waktu terdapat empat warna kurva yang digunakan yakni biru, merah, hijau dan cyan. Kurva biru menunjukkan stabil, kurva merah menunjukkan lintasan gangguan, kurva hijau menunjukkan kondisi tidak stabil, kurva cyan menunjukkan *critical trajectory*.

a. Titik gangguan D

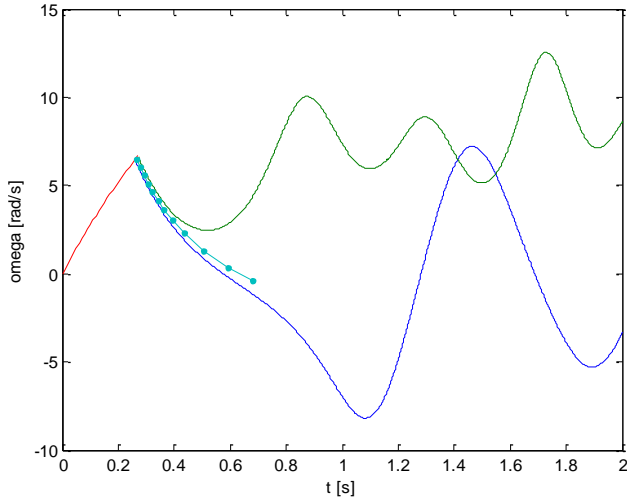
Saat gangguan di titik D yang terletak pada saluran antara bus 4-5 nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,2603 detik, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode simulasi numerik adalah dalam range 0,26-0,27 detik.



Gambar 4. 32 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan *dampner winding* bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan D



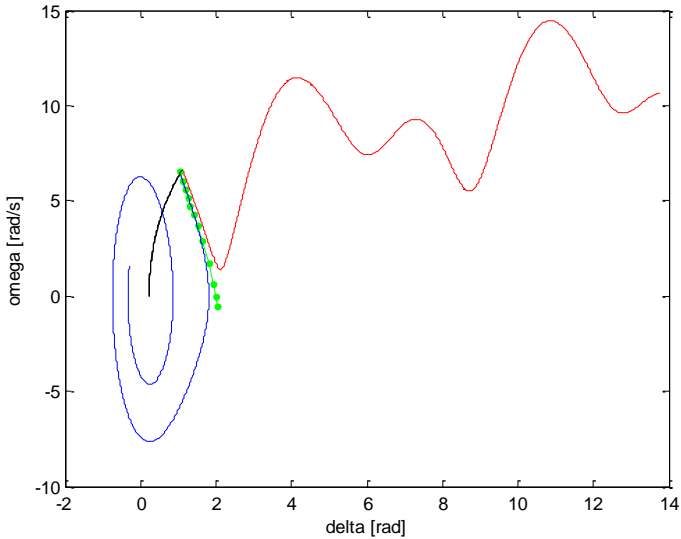
Gambar 4. 33 Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan *dampner winding* bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan D



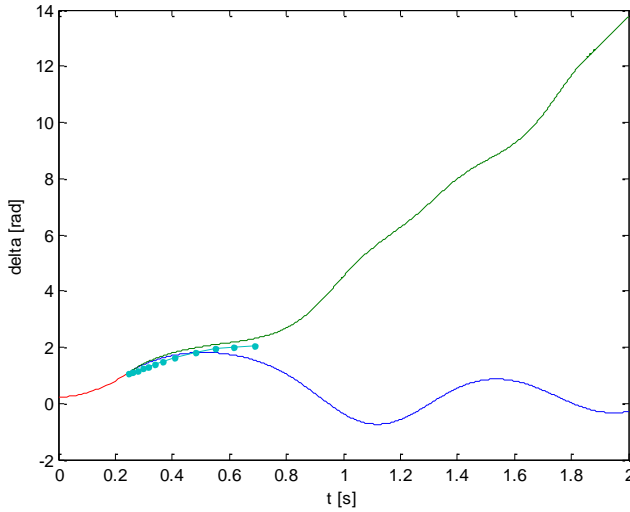
Gambar 4. 34 Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan *dampner winding* bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan D

b. Titik gangguan F

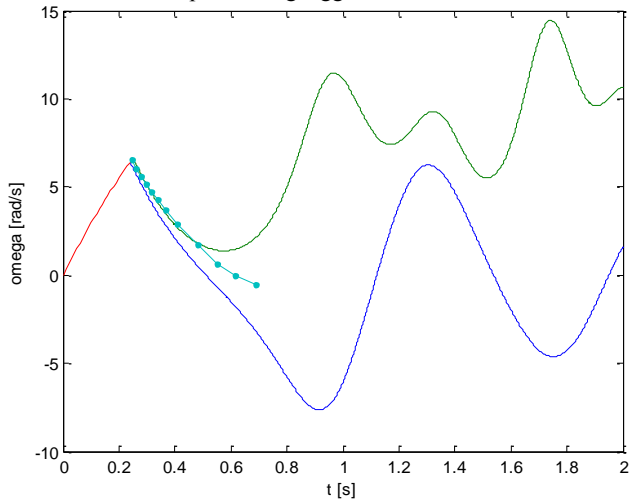
Saat gangguan di titik F yang terletak pada saluran antara bus 7-5 nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,2477 detik, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode simulasi numerik adalah dalam range 0,24-0,25 detik.



Gambar 4. 35 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan *damper winding* bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan F



Gambar 4. 36 Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan *dampner winding* bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan F



Gambar 4. 37 Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan *dampner winding* bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan F

4.1.3.3 Gangguan 3 fasa ke tanah

Gangguan tiga fasa ke tanah pada hasil simulasi yang ditunjukkan Tabel 4.11 terjadi pada ketiga fasa. Berdasarkan simulasi yang dilakukan diperoleh beberapa parameter antara lain CCT, lama iterasi serta *error* pada kesembilan titik. Nilai *error* yang diperoleh merupakan perbandingan metode yang diusulkan dengan metode *numerical simulation* atau yang lebih dikenal sebagai TDS (*Time Domain Simulation*).

Tabel 4. 11 Hasil perhitungan nilai CCT sistem 3 generator 9 bus menggunakan *damper winding* untuk gangguan 3 fasa ke tanah

Gangguan 3 Fasa ke Tanah (3LG)						
Fault Point	Open Line	Numerical simulation		Metode yang diusulkan		Error (%)
		CCT (s)	CPU (s)	CCT(s)	CPU (s)	
A	4-1	0,25-0,26	114,691	0,2535	1,4691	-
B	2-7	0,25-0,26	113,221	0,2550	1,3221	-
C	3-9	0,25-0,26	116,486	0,2507	1,6486	-
D	4-5	0,26-0,27	114,322	0,2605	1,4322	-
E	4-6	0,26-0,27	114,676	0,2601	1,4676	-
F	7-5	0,24-0,25	113,802	0,2450	1,3802	-
G	7-8	0,25-0,26	114,239	0,2534	1,4239	-
H	9-6	0,24-0,25	114,116	0,2494	1,4116	-
I	9-8	0,25-0,26	114,353	0,2571	1,4353	-

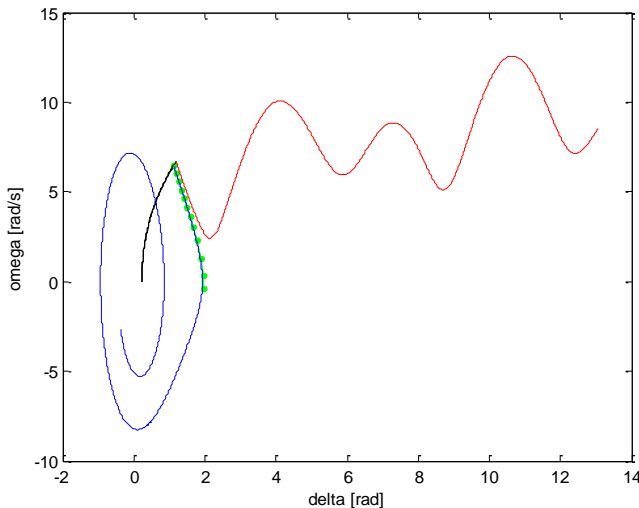
Pada metode simulasi numerik hasil CCT yang diperoleh berupa rentang nilai antara kondisi stabil dan tidak stabil sedangkan pada metode yang diusulkan nilai CCT langsung diperoleh. Perbandingan hasil CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan dengan metode simulasi numerik menunjukkan bahwa tidak terdapat *error* pada semua titik gangguan sehingga setting CCT aman untuk diterapkan. Dengan penambahan *damper winding* menyebabkan sistem lebih stabil sehingga waktu pemutus kritis generator bernilai lebih besar. Nilai waktu pemutus yang lebih besar ini dikarenakan sistem lebih mampu menahan gangguan transien selama sekian detik akibat adanya kumparan peredam.

Berikut ini dilampirkan 3 grafik pada titik-titik gangguan seperti sub bab sebelumnya. Pada grafik kecepatan sudut terhadap besar sudut rotor terdapat tiga warna kurva yang digunakan yakni biru, merah dan hijau. Kurva warna biru menunjukkan kondisi stabil yang ditunjukkan dengan osilasi pada SEP, warna merah menunjukkan kondisi tidak stabil yakni grafik semakin ke atas dan warna hijau menunjukkan *critical trajectory* yang diperoleh dengan menggunakan metode yang diusulkan.

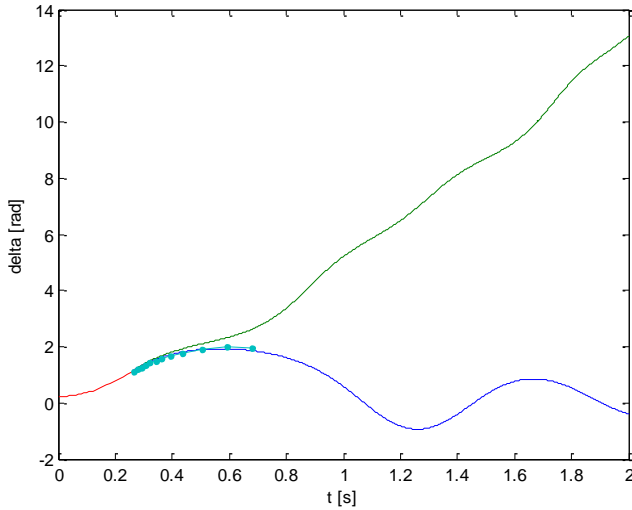
Sedangkan pada grafik kecepatan sudut terhadap waktu dan grafik sudut rotor terhadap waktu, kurva warna merah menunjukkan lintasan gangguan, warna biru untuk kondisi stabil yang ditunjukkan dengan osilasi di sekitar *steady state*, warna hijau untuk kondisi tidak stabil yang ditunjukkan dengan peningkatan kecepatan sudut dan sudut rotor secara terus menerus, serta kurva warna cyan menunjukkan *critical trajectory*. Grafik yang ditampilkan adalah pada 2 titik gangguan D dan F yang dianggap mewakili keseluruhan titik.

a. Titik gangguan D

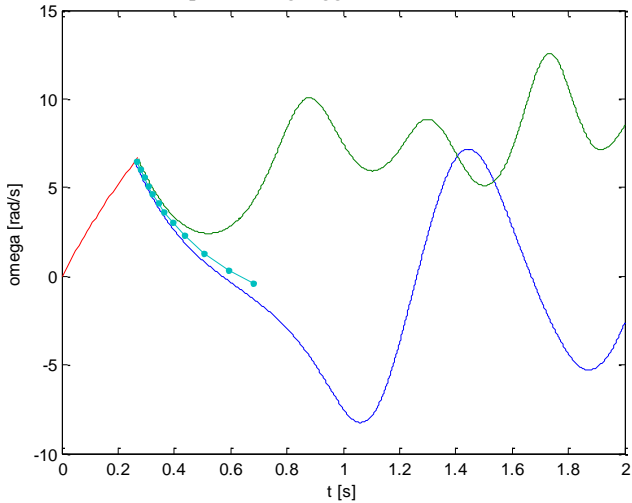
Saat gangguan di titik D yang terletak pada saluran antara bus 4-5 nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,2605 detik, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode simulasi numerik adalah dalam range 0,26-0,27 detik.



Gambar 4. 38 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan *damper winding* bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan D



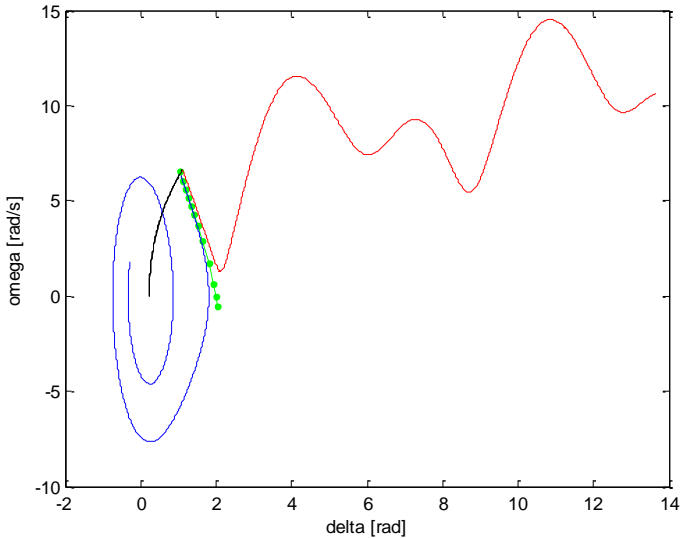
Gambar 4. 39 Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan *dampner winding* bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan D



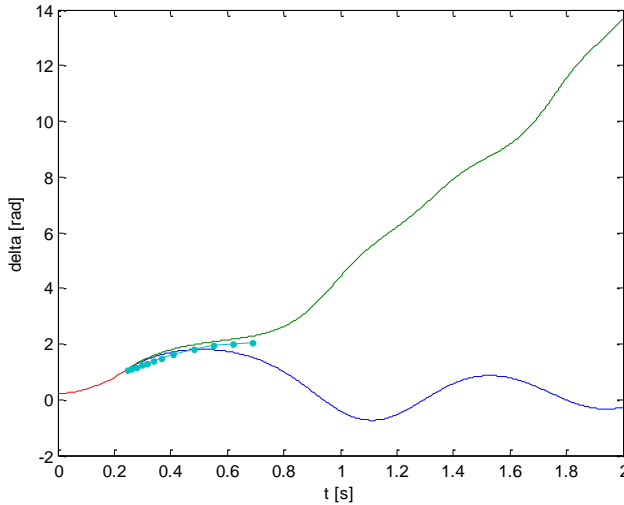
Gambar 4. 40 Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan *dampner winding* bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan D

b. Titik gangguan F

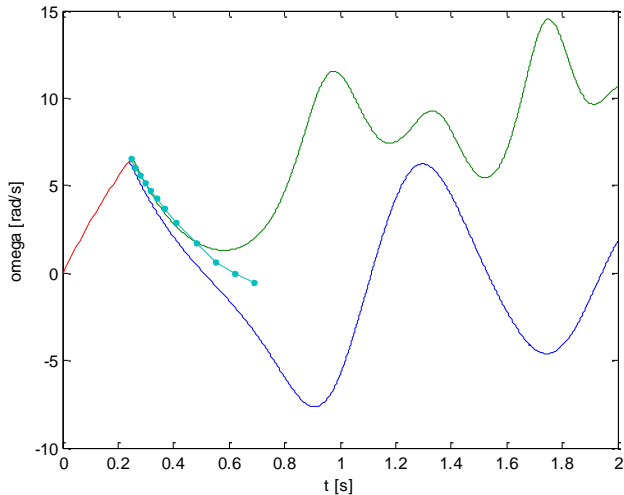
Saat gangguan di titik F yang terletak pada saluran antara bus 7-5 nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,2450 detik, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode simulasi numerik adalah dalam *range* 0,24-0,25 detik.



Gambar 4. 41 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan *damper winding* bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan F



Gambar 4. 42 Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan *dampner winding* bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan F



Gambar 4. 43 Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan *dampner winding* bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan F

4.1.3.4 Gangguan fasa ke fasa (line to line)

Gangguan tiga fasa ke tanah pada hasil simulasi yang ditunjukkan Tabel 4.12 terjadi pada ketiga fasa. Berdasarkan simulasi yang dilakukan diperoleh beberapa parameter antara lain CCT, lama iterasi serta *error* pada kesembilan titik. Nilai *error* yang diperoleh merupakan perbandingan metode yang diusulkan dengan metode *numerical simulation* atau yang lebih dikenal sebagai TDS (*Time Domain Simulation*).

Tabel 4. 12 Hasil perhitungan nilai CCT sistem 3 generator 9 bus menggunakan *damper winding* untuk gangguan antar fasa (*line to line*)

Gangguan Antar Fasa (2LL)						
Fault Point	Open Line	Numerical Simulation		Metode yang diusulkan		Error (%)
		CCT (s)	CPU (s)	CCT (s)	CPU (s)	
A	4-1	0,25-0,26	114,682	0,2541	1,4682	-
B	2-7	0,24-0,25	113,698	0,2467	1,3698	-
C	3-9	0,25-0,26	113,856	0,2542	1,3856	-
D	4-5	0,26-0,27	114,272	0,2606	1,4272	-
E	4-6	0,26-0,27	113,742	0,2636	1,3742	-
F	7-5	0,24-0,25	113,481	0,2449	1,3481	-
G	7-8	0,25-0,26	113,915	0,2540	1,3915	-
H	9-6	0,24-0,25	114,626	0,2470	1,4626	-
I	9-8	0,25-0,26	114,249	0,2585	1,4249	-

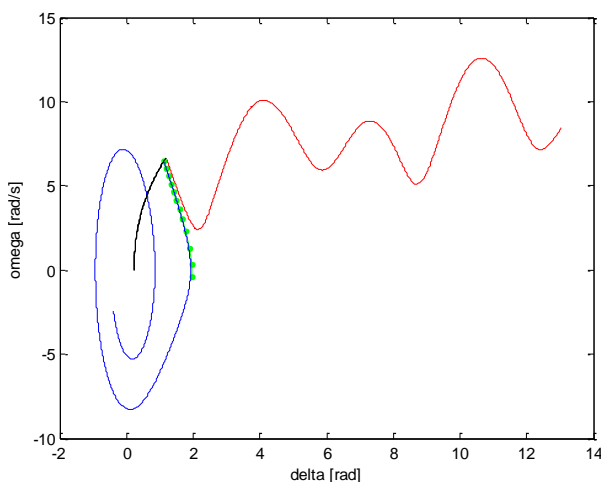
Pada metode simulasi numerik hasil CCT yang diperoleh berupa rentang nilai antara kondisi stabil dan tidak stabil sedangkan pada metode yang diusulkan nilai CCT langsung diperoleh. Perbandingan hasil CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan dengan metode simulasi numerik menunjukkan bahwa tidak terdapat *error* pada semua titik gangguan sehingga setting CCT aman untuk diterapkan. Dengan penambahan *damper winding* menyebabkan sistem lebih stabil sehingga waktu pemutus kritis generator bernilai lebih besar. Nilai waktu pemutus yang lebih besar ini dikarenakan sistem lebih mampu menahan gangguan transien selama sekian detik akibat adanya kumparan peredam.

Berikut ini dilampirkan 3 grafik pada titik-titik gangguan seperti sub bab sebelumnya. Grafik yang ditampilkan adalah pada 2 titik gangguan D dan F yang dianggap mewakili keseluruhan titik. Pada grafik kecepatan sudut terhadap besar sudut rotor terdapat tiga warna kurva yang digunakan yakni biru, merah dan hijau. Kurva warna biru menunjukkan kondisi stabil yang ditunjukkan dengan osilasi pada SEP, warna merah

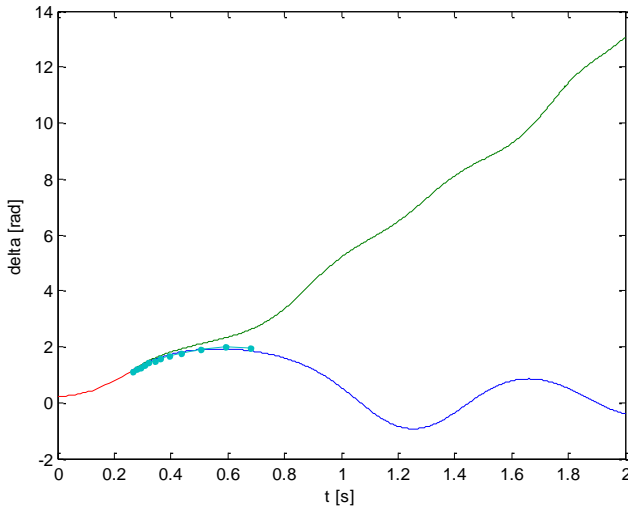
menunjukkan kondisi tidak stabil yakni grafik semakin ke atas dan warna hijau menunjukkan *critical trajectory* yang diperoleh dengan menggunakan metode yang diusulkan. Sedangkan pada grafik kecepatan sudut terhadap waktu dan grafik sudut rotor terhadap waktu, kurva warna merah menunjukkan lintasan gangguan, warna biru untuk kondisi stabil yang ditunjukkan dengan osilasi di sekitar *steady state*, warna hijau untuk kondisi tidak stabil yang ditunjukkan dengan peningkatan kecepatan sudut dan sudut rotor secara terus menerus, serta kurva warna cyan menunjukkan *critical trajectory*.

a. Titik gangguan D

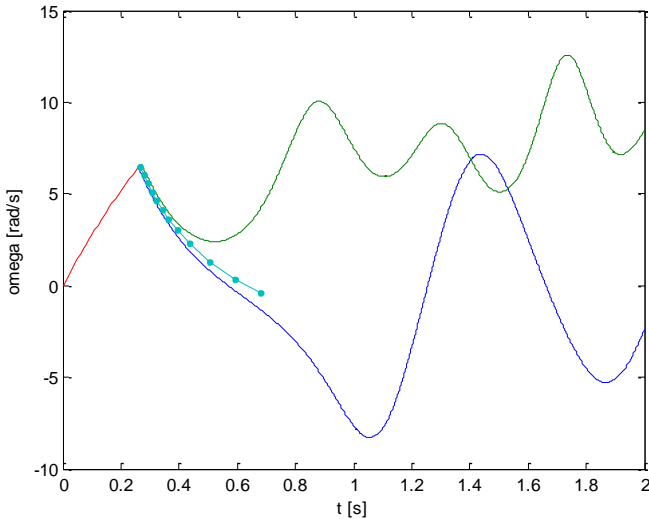
Saat gangguan di titik D yang terletak pada saluran antara bus 4-5 nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,2606 detik, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode simulasi numerik adalah dalam range 0,26-0,27 detik.



Gambar 4. 44 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan *dampers winding* bila mengalami gangguan fasa ke fasa pada titik gangguan D



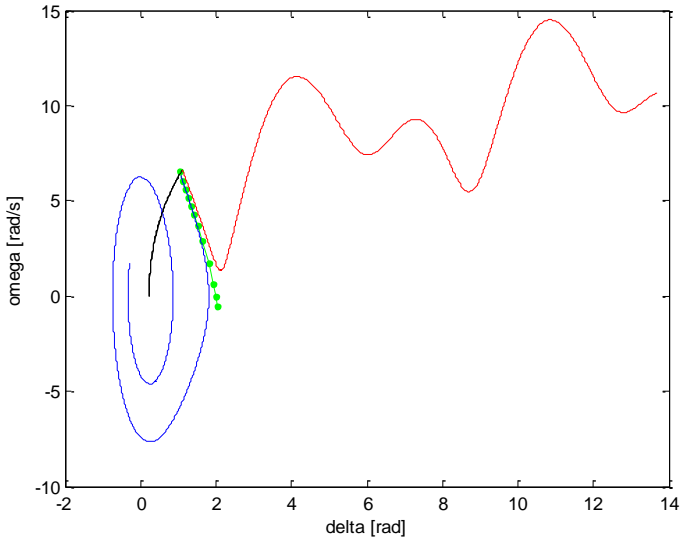
Gambar 4. 45 Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan *dampner winding* bila mengalami gangguan fasa ke fasa pada titik gangguan D



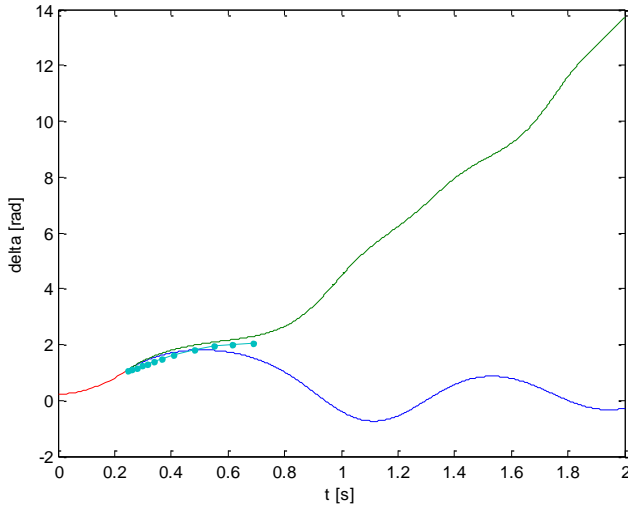
Gambar 4. 46 Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan *dampner winding* bila mengalami gangguan fasa ke fasa pada titik gangguan D

b. Titik gangguan F

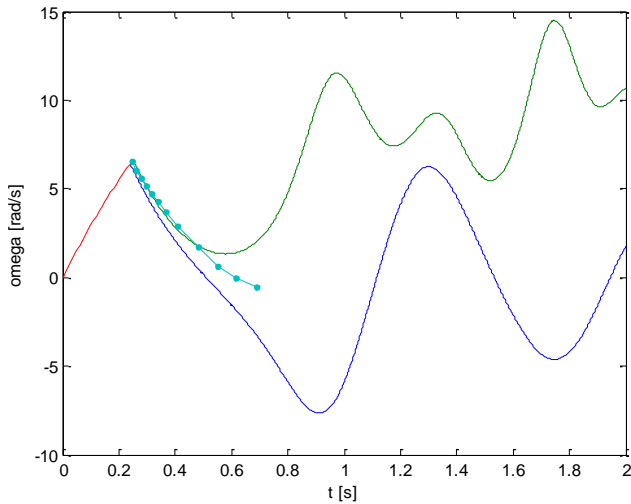
Saat gangguan di titik F yang terletak pada saluran antara bus 7-5 nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,2449 detik, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode simulasi numerik adalah dalam range 0,24-0,25 detik.



Gambar 4. 47 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan *dampers winding* bila mengalami gangguan fasa ke fasa pada titik gangguan F



Gambar 4. 48 Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (*t*) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan *damper winding* bila mengalami gangguan fasa ke fasa pada titik gangguan F



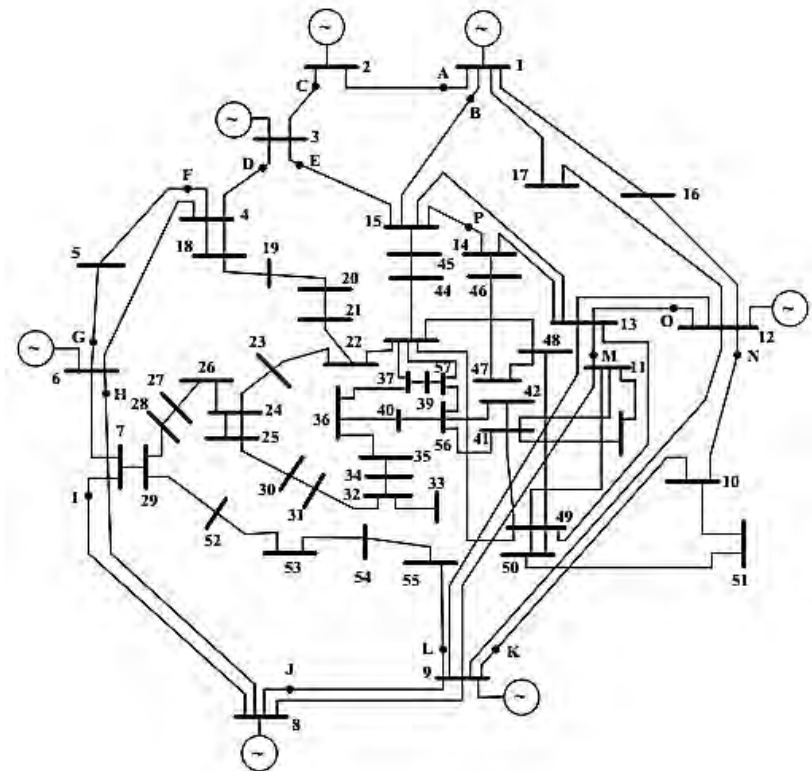
Gambar 4. 49 Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (*t*) dalam detik pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan *damper winding* bila mengalami gangguan fasa ke fasa pada titik gangguan F

4.2 Perhitungan CCT Sistem 7 Generator 57 Bus IEEE

Selain sistem 3 generator 9 bus, simulasi juga dilakukan pada sistem 7 generator 57 bus tanpa kontroler. Sama seperti pada sistem sebelumnya, simulasi pada sistem 7 generator 57 bus dilakukan baik dengan menggunakan *damper winding* maupun tanpa *damper winding*. Generator yang berfungsi sebagai *swing/slack* adalah generator 1. Pada simulasi ini digunakan 16 titik gangguan yang dianggap dapat mewakili keseluruhan gangguan yang mungkin terjadi. Titik-titik gangguan tersebut dijelaskan sebagai berikut:

- A : titik gangguan antara bus 1 dan bus 2, dekat bus 1
- B : titik gangguan antara bus 1 dan bus 15, dekat bus 1
- C : titik gangguan antara bus 2 dan bus 3, dekat bus 2
- D : titik gangguan antara bus 3 dan bus 4, dekat bus 3
- E : titik gangguan antara bus 3 dan bus 15, dekat bus 3
- F : titik gangguan antara bus 4 dan bus 5, dekat bus 4
- G : titik gangguan antara bus 6 dan bus 5, dekat bus 6
- H : titik gangguan antara bus 6 dan bus 8, dekat bus 6
- I : titik gangguan antara bus 7 dan bus 8, dekat bus 7
- J : titik gangguan antara bus 8 dan bus 9, dekat bus 8
- K : titik gangguan antara bus 9 dan bus 10, dekat bus 9
- L : titik gangguan antara bus 9 dan bus 55, dekat bus 9
- M : titik gangguan antara bus 11 dan bus 13, dekat bus 11
- N : titik gangguan antara bus 12 dan bus 10, dekat bus 12
- O : titik gangguan antara bus 12 dan bus 13, dekat bus 12
- P : titik gangguan antara bus 14 dan bus 15, dekat bus 14

Semua titik gangguan tersebut ditunjukkan oleh gambar berikut:



Gambar 4. 50 Sistem 7 generator 57 bus IEEE

Data impedansi saluran sistem IEEE 7 generator 57 bus di atas ditunjukkan pada Tabel 4.13 dan Tabel 4.14. Sedangkan data pembangkit dan beban ditunjukkan pada Tabel 4.15

4.2.1 Parameter Awal dan Tahapan Perhitungan CCT

Parameter-parameter yang perlu diinputkan terlebih dahulu sebelum dilakukan perhitungan CCT, antara lain data sistem seperti impedansi saluran, kapasitas pembangkit dan beban, serta parameter awal yang diperoleh dari aliran daya.

Tabel 4. 13 Data Impedansi Saluran Urutan Positif dan Negatif Sistem 7 Generator 57 Bus IEEE

No. Line	Dari Bus	Menuju Bus	R (p.u.)	X (p.u.)	<i>Half Line Charging Susceptance (p.u)</i>
1	1	2	0,0083	0,0280	0,0645
2	2	3	0,0298	0,0850	0,0409
3	3	4	0,0112	0,0366	0,0190
4	4	5	0,0625	0,1320	0,0129
5	4	6	0,0430	0,1480	0,0174
6	6	7	0,0200	0,1020	0,0138
7	6	8	0,0339	0,1730	0,0235
8	8	9	0,0099	0,0505	0,0274
9	9	10	0,0369	0,1679	0,0220
10	9	11	0,0258	0,0848	0,0109
11	9	12	0,0648	0,2950	0,0386
12	9	13	0,0481	0,1580	0,0203
13	13	14	0,0132	0,0434	0,0055
14	13	15	0,0269	0,0869	0,0115
15	1	15	0,0178	0,0910	0,0494
16	1	16	0,0454	0,2060	0,0273
17	1	17	0,0238	0,1080	0,0143
18	3	15	0,0162	0,0530	0,0272
19	4	18	0,0	0,2423	0,0
20	5	6	0,0302	0,0641	0,0062
21	7	8	0,0139	0,0712	0,0097
22	10	12	0,0277	0,1262	0,0164
23	11	13	0,0223	0,0732	0,0094
24	12	13	0,0178	0,0580	0,0302
25	12	16	0,0180	0,0813	0,0108
26	12	17	0,0397	0,179	0,0238
27	14	15	0,0171	0,0547	0,0074
28	18	19	0,4610	0,6850	0,0

Lanjutan Tabel 4. 13 Data Impedansi Saluran Urutan Positif dan Negatif Sistem 7 Generator 57 Bus IEEE

No. Line	Dari Bus	Menuju Bus	R (p.u.)	X (p.u.)	<i>Half Line Charging Susceptance (p.u)</i>
29	19	20	0,2830	0,4340	0,0
30	20	21	0,0	0,7767	0,0
31	21	22	0,0736	0,1170	0,0
32	22	23	0,0099	0,0152	0,0
33	23	24	0,1660	0,2560	0,0042
34	24	25	0,0	0,6028	0,0
35	24	26	0,0	0,0473	0,0
36	26	27	0,1650	0,2540	0,0
37	27	28	0,0618	0,0954	0,0
38	28	29	0,0418	0,0587	0,0
39	7	29	0,0	0,0648	0,0
40	25	30	0,1350	0,2020	0,0
41	30	31	0,3260	0,4970	0,0
42	31	32	0,5070	0,7550	0,0
43	32	33	0,0392	0,0360	0,0
44	32	34	0,0	0,9530	0,0
45	34	35	0,0520	0,0780	0,0016
46	35	36	0,0430	0,0537	0,0008
47	36	37	0,0290	0,0366	0,0
48	37	38	0,0651	0,1009	0,0010
49	37	39	0,0239	0,0379	0,0
50	36	40	0,0300	0,0466	0,0
51	22	38	0,0192	0,0295	0,0
52	11	41	0,0	0,7490	0,0
53	41	42	0,2070	0,3520	0,0
54	41	43	0,0	0,4120	0,0
55	38	44	0,0289	0,0585	0,0010
56	15	45	0,0	0,1042	0,0

Lanjutan Tabel 4. 13 Data Impedansi Saluran Urutan Positif dan Negatif Sistem 7 Generator 57 Bus IEEE

No. Line	Dari Bus	Menuju Bus	R (p.u.)	X (p.u.)	<i>Half Line Charging Susceptance (p.u)</i>
57	14	46	0,0	0,0735	0,0
58	46	47	0,0230	0,0680	0,0016
59	47	48	0,0182	0,0233	0,0
60	48	49	0,0834	0,1290	0,0024
61	49	50	0,0801	0,1280	0,0
62	50	51	0,1386	0,2200	0,0
63	10	51	0,0	0,0712	0,0
64	13	49	0,0	0,1910	0,0
65	29	52	0,1442	0,1870	0,0
66	52	53	0,0762	0,0984	0,0
67	53	54	0,1878	0,2320	0,0
68	54	66	0,1732	0,2265	0,0
69	11	43	0,0	0,1530	0,0
70	44	45	0,0624	0,1242	0,002
71	40	56	0,0	1,1950	0,0
72	41	56	0,5530	0,5490	0,0
73	42	56	0,2125	0,3540	0,0
74	39	57	0,0	1,3550	0,0
75	56	57	0,1740	0,2600	0,0
76	38	49	0,1150	0,1770	0,0030
77	38	48	0,0312	0,0482	0,0
78	9	55	0,0	0,1205	0,0

Data saluran di atas merupakan data impedansi saluran untukurutan positif, impedansi saluran untuk urutan negatif diasumsikan bernilai sama dengan urutan positif. Sedangkan impedansi saluran urutan nol diasumsikan bernilai sepertiga impedansi urutan positif.

Tabel 4. 14 Data Impedansi Saluran Urutan Nol Sistem 7 Generator 57 Bus IEEE

No. Line	Dari Bus	Menuju Bus	R (p.u.)	X (p.u.)
1	1	2	0,0027	0,0093
2	2	3	0,0099	0,0283
3	3	4	0,0037	0,0122
4	4	5	0,0208	0,044
5	4	6	0,0143	0,0493
6	6	7	0,0006	0,034
7	6	8	0,0113	0,0576
8	8	9	0,0003	0,0168
9	9	10	0,0123	0,0559
10	9	11	0,0086	0,0282
11	9	12	0,0216	0,0983
12	9	13	0,016	0,0526
13	13	14	0,0044	0,0144
14	13	15	0,0089	0,0289
15	1	15	0,0059	0,0303
16	1	16	0,0151	0,0686
17	1	17	0,0079	0,036
18	3	15	0,0054	0,0176
19	4	18	0,0	0,0807
20	5	6	0,01	0,0213
21	7	8	0,0046	0,0237
22	10	12	0,0092	0,042
23	11	13	0,0074	0,0244
24	12	13	0,0059	0,0193
25	12	16	0,0060	0,0271
26	12	17	0,0013	0,0596
27	14	15	0,0057	0,0182
28	18	19	0,1536	0,2283
29	19	20	0,0943	0,1446
30	20	21	0,0	0,2589
31	21	22	0,0245	0,039
32	22	23	0,0033	0,0050
33	23	24	0,0553	0,0853
34	24	25	0,0	0,2009
35	24	26	0,0	0,0157

Lanjutan Tabel 4.14 Data Impedansi Saluran Urutan Nol Sistem 7 Generator 57 Bus IEEE

No. Line	Dari Bus	Menuju Bus	R (p.u.)	X (p.u.)
36	26	27	0,055	0,0846
37	27	28	0,0206	0,0318
38	28	29	0,0139	0,0195
39	7	29	0,0	0,0216
40	25	30	0,045	0,0673
41	30	31	0,1086	0,1656
42	31	32	0,169	0,2516
43	32	33	0,013	0,012
44	32	34	0,0	0,3176
45	34	35	0,0173	0,026
46	35	36	0,0143	0,0179
47	36	37	0,0096	0,0122
48	37	38	0,0217	0,0336
49	37	39	0,0079	0,0126
50	36	40	0,01	0,0155
51	22	38	0,0064	0,0098
52	11	41	0,0	0,2496
53	41	42	0,069	0,1173
54	41	43	0,0	0,1373
55	38	44	0,0096	0,0195
56	15	45	0,0	0,0347
57	14	46	0,0	0,0245
58	46	47	0,0076	0,0226
59	47	48	0,0060	0,0077
60	48	49	0,0278	0,043
61	49	50	0,0267	0,0426
62	50	51	0,0462	0,0733
63	10	51	0,0	0,0237
64	13	49	0,0	0,0636
65	29	52	0,048	0,0623
66	52	53	0,0254	0,0328
67	53	54	0,0626	0,0773
68	54	55	0,0577	0,0755
69	11	43	0,0	0,051
70	44	45	0,0208	0,0414

Lanjutan Tabel 4.14 Data Impedansi Saluran Urutan Nol Sistem 7 Generator 57 Bus IEEE

No. Line	Dari Bus	Menuju Bus	R (p.u.)	X (p.u.)
71	40	56	0,0	0,3983
72	41	56	0,1843	0,183
73	42	56	0,0708	0,118
74	39	57	0,0	0,4516
75	56	57	0,058	0,0866
76	38	49	0,0383	0,059
77	38	48	0,0104	0,016
78	9	55	0,0	0,0401

Tabel 4. 15 Data Pembangkit dan Beban Sistem 7 Generator 57 Bus IEEE

No. Bus	P Generator (MW)	Q Generator (MVAR)	P Beban (MW)	Q Beban (MVAR)
1	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	3	88
3	40	0,00	41	21
5	0,00	0,00	13	4
6	0,00	0,00	75	2
8	450	0,00	150	22
9	0,00	0,00	121	26
10	0,00	0,00	5	2
12	310	0,00	377	24
13	0,00	0,00	18	2,3
14	0,00	0,00	10,5	5,3
15	0,00	0,00	22	5
16	0,00	0,00	43	3
17	0,00	0,00	42	8
18	0,00	0,00	27,2	9,8
19	0,00	0,00	3,3	0,6
20	0,00	0,00	2,3	1
23	0,00	0,00	6,3	2,1
25	0,00	0,00	6,3	3,2
27	0,00	0,00	9,3	0,5
28	0,00	0,00	4,6	2,3

Tahapan awal dalam perhitungan CCT adalah aliran daya sistem untuk memperoleh parameter awal yang akan digunakan pada proses selanjutnya. Hasil yang diperoleh dalam aliran daya antara lain daya mekanis generator, daya generator, tegangan bus generator dan tegangan generator.

Tabel 4. 16 Hasil Iterasi Aliran Daya untuk Sistem 7 Generator 57 Bus IEEE

Gen	Tegangan bus generator (p.u)	Daya Generator (p.u)	Tegangan Terminal Generator (p.u)
1	1,04	4.2501+j1.1333	1.3931+j1.3241
2	1,0098-j0,0211	-0.0300-j0.8872	0.8059-j0.0237
3	0,9796-j0,1034	-0.0010-j0.1176	0.9518-j0.1029
6	0,9685-j0,1496	-0.7500+j0.0633	0.9593-j0.2830
8	1,0018-j0,0802	3.0000+j0.4608	1.1228+j0.4312
9	0,9661-j0,1644	-1.2100-j0.2086	0.8936-j 0.3700
12	0.9980-j0.1852	-0.6700+j1.04189	1.1526-j 0.3307

Langkah selanjutnya setelah aliran daya adalah reduksi matriks. Reduksi matriks bertujuan menyederhanakan matriks sistem dengan menghilangkan node yang tidak diperhitungkan. Arus yang mengalir ke beban bernilai nol sehingga bus beban dapat dihilangkan. Arus kontribusi gangguan hubung singkat hanya berasal dari generator dikarenakan beban hanya berupa beban statis. Oleh karena itu hasil dari reduksi matriks tersisa matriks generator.

Trajektori kritis dimulai dari lintasan gangguan (*fault on trajectory*) pada CCT hingga titik kritis dimana pada metode yang diusulkan titik kritis yang digunakan adalah saat sistem kehilangan sinkronisasinya. Untuk merepresentasikan trajektori kritis digunakan metode runge kutta orde 4 dan persamaan trapezoidal. Runge kutta orde 4 diperlukan untuk mencari nilai x^0 sebagai penggambaran kondisi *pre fault* dan *on fault*, sedangkan trapezoidal digunakan untuk memperoleh trajektori kritis yakni yang dimulai dari lintasan gangguan, saat gangguan dihilangkan pada titik x^0 hingga x^u sebagai titik akhir trajektori kritis.

Setelah diperoleh titik dari x^0 hingga x^u berdasarkan metode trapezoidal, langkah selanjutnya untuk memperoleh trajektori kritis digunakan metode newton raphson. Perhitungan yang dilakukan berupa iterasi dengan metode newton raphson dimana matriks jacobian sebagai inputannya hingga dicapai kondisi konvergen. Dengan ditemukannya trajektori kritis maka waktu pemutus kritis juga ditemukan.

4.2.2 Perhitungan CCT Sistem 7 generator 57 bus Tanpa Damper Winding

Perhitungan CCT dilakukan dengan mempertimbangkan kondisi *unbalance* yang diakibatkan oleh gangguan asimetri. Oleh karena itu terdapat beberapa gangguan yang dianalisa antara lain gangguan satu fasa ke tanah, gangguan dua fasa ke tanah, gangguan antar fasa, serta gangguan simetri berupa gangguan tiga fasa ke tanah. Simulasi dilakukan pada sistem 7 generator 57 bus baik dengan menggunakan *damper winding* maupun tidak. Pada sub bab ini dilampirkan hasil simulasi perhitungan CCT pada sistem 7 generator 57 bus dengan mengabaikan *damper winding*.

4.2.2.1 Gangguan 1 fasa ke tanah

Gangguan satu fasa ke tanah pada hasil simulasi yang ditunjukkan Tabel 4.17 terjadi pada fasa ke-1. Berdasarkan simulasi yang dilakukan diperoleh beberapa parameter antara lain CCT, lama iterasi serta *error*. Nilai *error* yang dipeoleh merupakan perbandingan metode yang diusulkan dengan metode *numerical simulation* atau yang lebih dikenal sebagai TDS (*Time Domain Simulation*).

Tabel 4. 17 Hasil perhitungan nilai CCT sistem 7 generator 57 bus tanpa *damper winding* untuk gangguan 1 fasa ke tanah

Gangguan 1 Fasa ke Tanah (ILG)						
Fault Point	Open Line	Numerical Simulation		Metode yang diusulkan		Error (%)
		CCT (s)	CPU (s)	CCT	CPU (s)	
A	1-2	0,10-0,11	109,186	0,1019	0,9186	-
B	1-15	0,10-0,11	109,453	0,1018	0,9453	-
C	2-3	0,09-0,10	110,358	0,0923	1,0358	-
D	3-4	0,10-0,11	109,059	0,1002	0,9059	-
E	3-15	0,10-0,11	109,278	0,1003	0,9278	-
F	4-5	0,10-0,11	109,109	0,1014	0,9109	-
G	6-5	0,10-0,11	109,145	0,1023	0,9145	-
H	6-8	0,09-0,10	108,892	0,0974	0,8892	-
I	7-8	0,09-0,10	108,82	0,0926	0,882	-
J	8-9	0,09-0,10	108,845	0,0942	0,8845	-
K	9-10	0,10-0,11	109,151	0,1017	0,9151	-
L	9-55	0,10-0,11	109,001	0,1027	0,9001	-
M	11-13	0,10-0,11	109,122	0,1018	0,9122	-
N	12-10	0,10-0,11	109,371	0,1016	0,9371	-

O	12-13	0,10-0,11	111,597	0,1037	1,1597	-
P	14-15	0,10-0,11	109,443	0,1020	0,9443	-

Hasil simulasi di atas dibandingkan antara nilai CCT antara metode yang diusulkan dengan metode simulasi numerik. Pada metode simulasi numerik hasil CCT yang diperoleh berupa rentang nilai antara kondisi stabil dan tidak stabil sedangkan pada metode yang diusulkan nilai CCT langsung diperoleh. Dengan demikian dapat dihitung prosentase kesalahan pada setiap titik gangguan.

Berdasarkan Tabel 4.17 di atas diperoleh nilai CCT pada setiap titik gangguan sesuai dengan hasil metode simulasi numerik. Misalkan pada titik A diperoleh hasil simulasi numerik dalam *range* CCT adalah 0,10-0,11 detik yang berarti bahwa sistem stabil saat pemutus daya bekerja setelah 0,10 detik dan sistem tidak stabil saat pemutus daya bekerja setelah 0,11 detik. Pada simulasi dengan metode yang diusulkan diperoleh CCT sebesar 0,1019 detik, dikarenakan berada dalam *range* 0,10-0,11 maka untuk titik gangguan A tidak terdapat *error*.

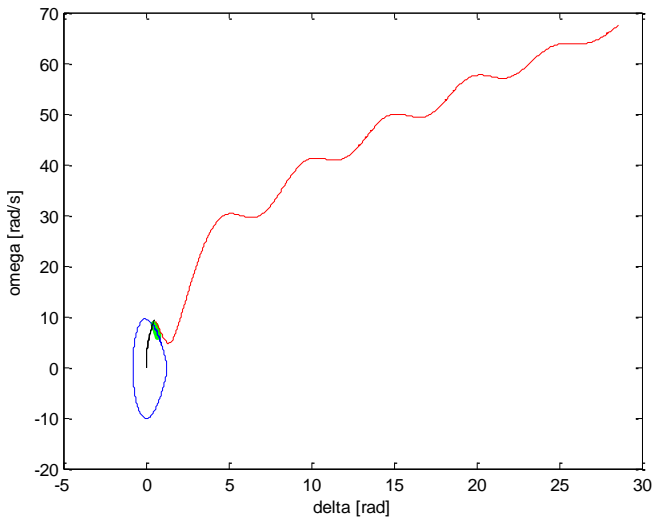
Waktu yang diperlukan untuk simulasi (CPU time) tergantung pada spesifikasi computer yang digunakan. Pada metode konvensional simulasi numerik diperlukan *trial* dan *error* untuk memperoleh nilai *range* CCT stabil dan tidak stabil untuk tiap gangguan. Sedangkan pada metode yang diusulkan waktu simulasi diperoleh dari waktu *run* program karena merupakan *direct method*.

Grafik yang ditampilkan adalah pada 2 titik gangguan B dan C yang dianggap mewakili keseluruhan titik. Pada grafik pertama karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap sudut rotor (δ) yang ditampilkan terdapat tiga warna kurva yang digunakan yakni biru, merah dan hijau. Kurva warna biru menunjukkan kondisi stabil saat gangguan dihilangkan sebelum CCT, warna merah menunjukkan kondisi tidak stabil saat gangguan dihilangkan setelah CCT dan warna hijau menunjukkan *critical trajectory* yang diperoleh dengan menggunakan metode yang diusulkan. Kurva hijau yang mewakili *critical trajectory* berada di antara kurva stabil dan tidak stabil hasil simulasi TDS. Pada Gambar 4.51 menunjukkan bahwa saat kondisi stabil rotor berosilasi pada titik SEP (*Stable Equilibrium Point*) sedangkan saat kondisi tidak stabil yang ditunjukkan kurva merah kecepatan sudut rotor meningkat seiring pergeseran sudut rotor yang semakin besar. Peningkatan kecepatan sudut rotor secara terus menerus menyebabkan generator kehilangan sinkronisasinya.

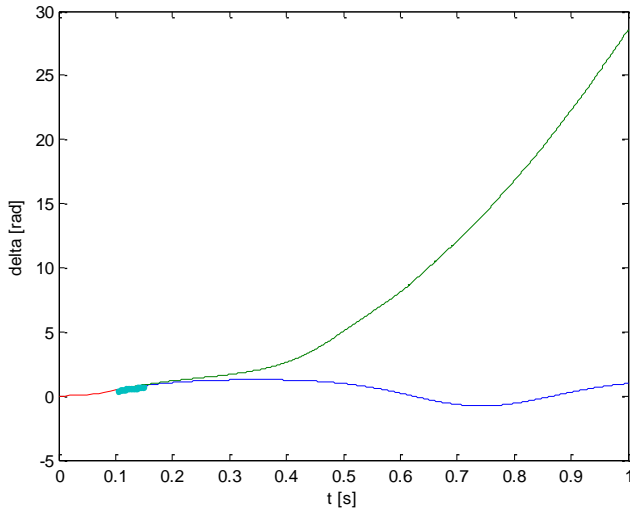
Grafik kedua dan ketiga yang ditunjukkan pada Gambar 4.52 dan Gambar 4.53 terdapat empat warna yakni merah, biru, hijau dan cyan. Kurva biru mewakili kondisi stabil, kurva merah mewakili lintasan gangguan (*fault on*), kurva hijau mewakili kondisi tidak stabil serta kurva cyan mewakili *critical trajectory*. Pada Gambar 4.52 yakni grafik sudut rotor (δ) terhadap waktu (t), besar sudut rotor untuk kondisi stabil berosilasi pada sekitar nol radian yang berarti bahwa tidak terjadi pergeseran sudut rotor yang signifikan sedangkan untuk kondisi tidak stabil sudut rotor meningkat seiring meningkatnya waktu. Begitu pula pada Gambar 4.53 yakni grafik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap waktu (t), kecepatan sudut rotor pada kondisi stabil berosilasi pada nilai sekitar kondisi *steady state* sedangkan pada kondisi tidak stabil kecepatan sudut rotor meningkat terus menerus seiring pertambahan waktu

a. Titik gangguan B

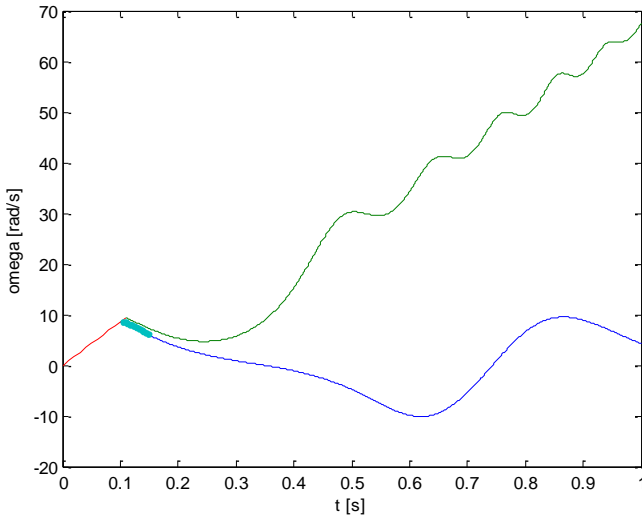
Saat gangguan di titik B yang terletak pada saluran antara bus 1-15 nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,1018 detik, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode simulasi numerik adalah dalam *range* 0,10-0,11 detik.



Gambar 4. 51 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 7 generator 57 bus tanpa *damper winding* bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan B



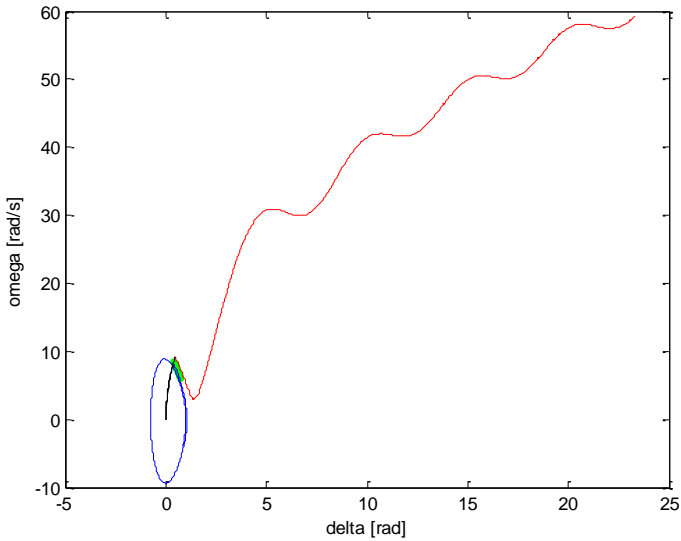
Gambar 4. 52 Grafik sudut rotor (δ) dalam rad terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus tanpa *damp*er winding bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan B



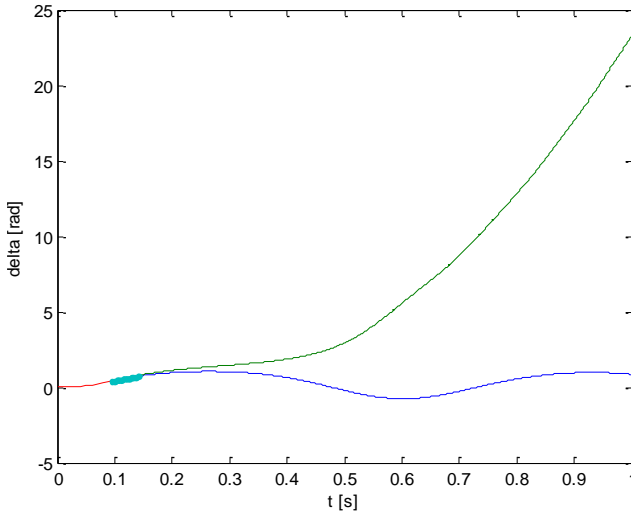
Gambar 4. 53 Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus tanpa *damp*er winding bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan B

b. Titik gangguan C

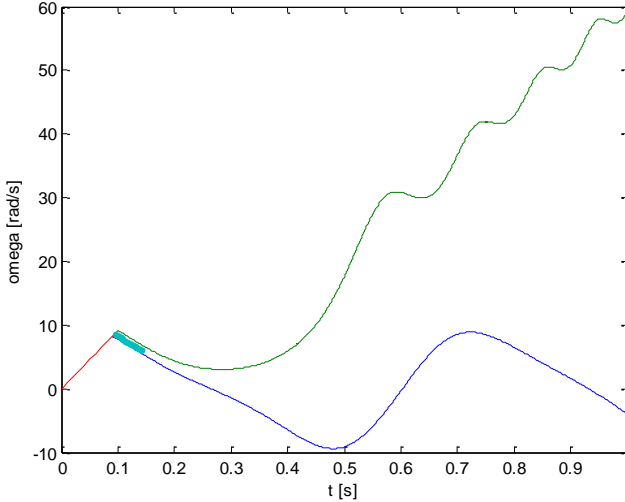
Saat gangguan di titik C yang terletak pada saluran antara bus 2-3 nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,0923 detik, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode simulasi numerik adalah dalam *range* 0,09-0,10 detik.



Gambar 4. 54 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 7 generator 57 bus tanpa *damper winding* bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan C



Gambar 4. 55 Grafik sudut rotor (δ) dalam rad terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus tanpa *dampers* bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan C



Gambar 4. 56 Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus tanpa *dampers* bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan C

4.2.2.2 Gangguan 2 fasa ke tanah

Gangguan dua fasa ke tanah pada hasil simulasi yang ditunjukkan Tabel 4.18 terjadi pada fasa 1 ke fasa 2. Berdasarkan simulasi yang dilakukan diperoleh beberapa parameter antara lain CCT, lama iterasi serta *error*. Nilai *error* yang diperoleh merupakan perbandingan metode yang diusulkan dengan metode *numerical simulation* atau yang lebih dikenal sebagai TDS (*Time Domain Simulation*).

Tabel 4. 18 Hasil perhitungan nilai CCT sistem 7 generator 57 bus tanpa *dampers* winding untuk gangguan 2 fasa ke tanah

Gangguan 2 fasa ke tanah (2LG)						
Fault Point	Open Line	Numerical Simulation		Metode yang Diusulkan		Error (%)
		CCT (s)	CPU (s)	CCT (s)	CPU (s)	
A	1-2	0,10-0,11	109,242	0,1025	0,9242	-
B	1-15	0,10-0,11	110,242	0,1021	1,0242	-
C	2-3	0,09-0,10	109,266	0,0911	0,9266	-
D	3-4	0,10-0,11	109,021	0,1001	0,9021	-
E	3-15	0,10-0,11	109,269	0,1033	0,9269	-
F	4-5	0,10-0,11	109,016	0,1015	0,9016	-
G	6-5	0,10-0,11	109,437	0,1023	0,9437	-
H	6-8	0,10-0,11	108,997	0,1025	0,8997	-
I	7-8	0,10-0,11	108,967	0,1031	0,8967	-
J	8-9	0,10-0,11	109,007	0,1046	0,9007	-
K	9-10	0,10-0,11	108,988	0,1016	0,8988	-
L	9-55	0,10-0,11	109,169	0,1017	0,9169	-
M	11-13	0,10-0,11	109,195	0,1021	0,9195	-
N	12-10	0,10-0,11	111,491	0,1003	1,1491	-
O	12-13	0,10-0,11	111,692	0,1039	1,1692	-
P	14-15	0,10-0,11	109,531	0,1029	0,9531	-

Hasil simulasi di atas dibandingkan antara nilai CCT antara metode yang diusulkan dengan metode simulasi numerik. Pada metode simulasi numerik hasil CCT yang diperoleh berupa rentang nilai antara kondisi stabil dan tidak stabil sedangkan pada metode yang diusulkan nilai CCT langsung diperoleh. Berdasarkan tabel di atas tidak terdapat *error* antara metode yang diusulkan dengan metode simulasi numerik. Sedangkan perhitungan waktu simulasi untuk metode TDS menggunakan persamaan (4.2), dimana diasumsikan untuk setiap titik gangguan dilakukan 10 kali

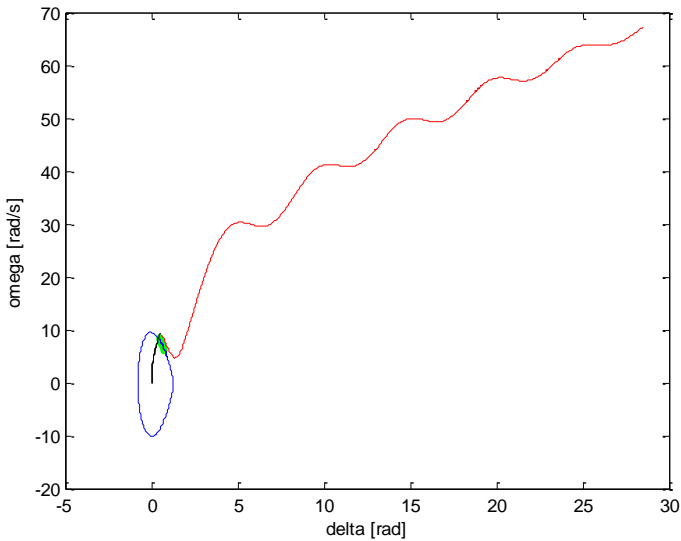
percobaan dengan masing-masing percobaan membutuhkan waktu untuk *trial and error* sekitar 10 detik. Oleh karena itu waktu simulasi metode konvensional TDS lebih lama sedangkan pada metode yang diusulkan jauh lebih cepat karena merupakan *direct method* sehingga waktu simulasi hanya berasal dari waktu *run* program.

Grafik yang ditampilkan adalah pada 2 titik gangguan B dan C yang dianggap mewakili keseluruhan titik gangguan. Terdapat masing-masing 3 jenis grafik yang ditampilkan antara lain grafik kecepatan terhadap sudut rotor seperti pada Gambar 4.57, grafik sudut rotor terhadap waktu seperti pada Gambar 4.58 dan grafik kecepatan sudut rotor terhadap waktu seperti pada gambar 4.59. Ketiga jenis grafik yang ditampilkan menunjukkan respon rotor saat kondisi stabil dan tidak stabil, seperti misalnya pada grafik besar sudut rotor terhadap waktu, besar sudut rotor meningkat terus menerus seiring bertambahnya waktu saat dalam kondisi tidak stabil, sedangkan pada saat stabil sudut rotor hanya berosilasi di sekitar nol radian.

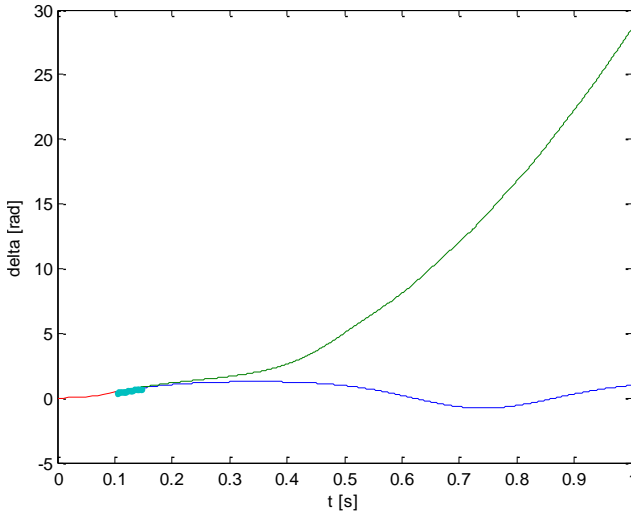
Pada grafik kecepatan sudut rotor terhadap sudut rotor yang ditampilkan terdapat tiga warna kurva yang digunakan yakni biru, merah dan hijau. Kurva warna biru menunjukkan kondisi stabil, warna merah menunjukkan kondisi tidak stabil dan warna hijau menunjukkan *critical trajectory* yang diperoleh dengan menggunakan metode yang diusulkan. Sedangkan pada grafik kecepatan sudut rotor terhadap waktu dan grafik sudut rotor terhadap waktu terdapat empat warna kurva yang digunakan yakni biru, merah, hijau dan cyan. Kurva biru menunjukkan kondisi stabil, kurva merah menunjukkan lintasan gangguan, kurva hijau menunjukkan kondisi tidak stabil, kurva cyan menunjukkan *critical trajectory*.

a. Titik gangguan B

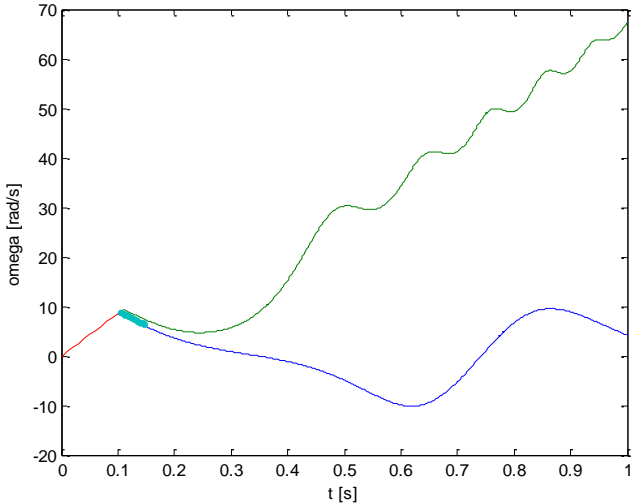
Saat gangguan di titik B yang terletak pada saluran antara bus 1-15 nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,1021 detik, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode simulasi numerik adalah dalam *range* 0,10-0,11 detik.



Gambar 4. 57 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 7 generator 57 bus tanpa *damper winding* bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan B



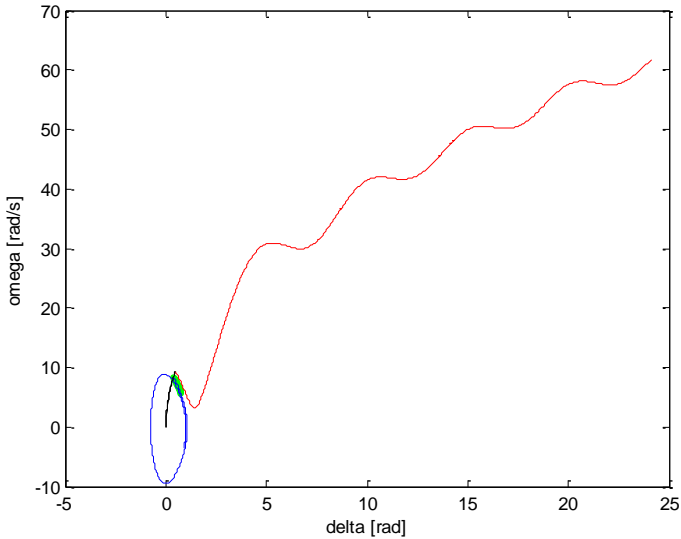
Gambar 4. 58 Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus tanpa *damp*er *winding* bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan B



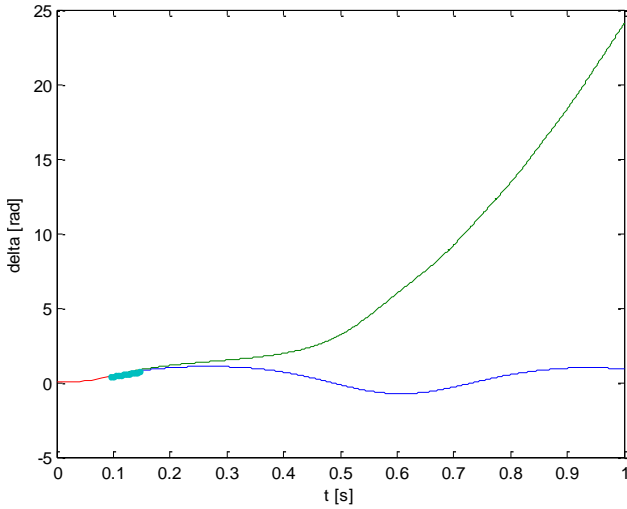
Gambar 4. 59 Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus tanpa *damp*er *winding* bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan B

b. Titik gangguan C

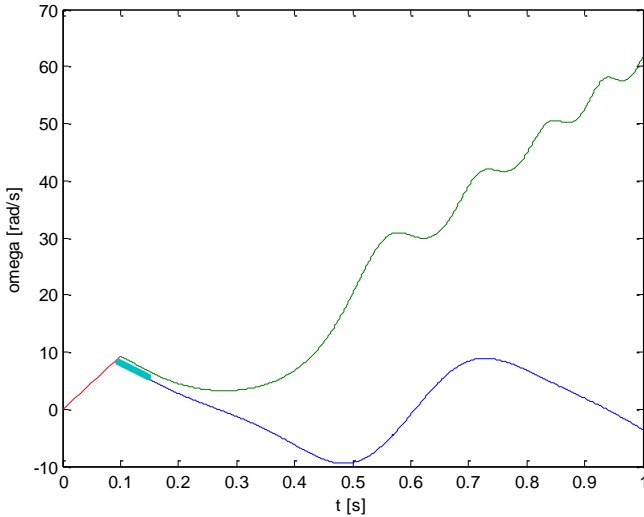
Saat gangguan di titik C yang terletak pada saluran antara bus 2-3 nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,0911 detik, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode simulasi numerik adalah dalam *range* 0,09-0,10 detik.



Gambar 4. 60 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 7 generator 57 bus tanpa *damper winding* bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan C



Gambar 4. 61 Grafik sudut rotor (δ) dalam rad terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus tanpa *damp*er winding bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan C



Gambar 4. 62 Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus tanpa *damp*er winding bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan C

4.1.2.3 Gangguan 3 fasa ke tanah

Gangguan tiga fasa ke tanah pada hasil simulasi yang ditunjukkan Tabel 4.19 terjadi pada ketiga fasa. Berdasarkan simulasi yang dilakukan diperoleh beberapa parameter antara lain CCT, lama iterasi serta *error*. Nilai *error* yang diperoleh merupakan perbandingan metode yang diusulkan dengan metode *numerical simulation* atau yang lebih dikenal sebagai TDS (*Time Domain Simulation*).

Tabel 4. 19 Hasil perhitungan nilai CCT sistem 7 generator 57 bus tanpa *damper winding* untuk gangguan 3 fasa ke tanah

Gangguan 3 Fasa ke Tanah (3LG)						
Fault Point	Open Line	Numerical Simulation		Metode yang Diusulkan		Error (%)
		CCT (s)	CPU (s)	CCT (s)	CPU (s)	
A	1-2	0,10-0,11	109,527	0,1025	0,9527	-
B	1-15	0,10-0,11	110,524	0,1020	1,0524	-
C	2-3	0,09-0,10	109,884	0,0941	0,9884	-
D	3-4	0,10-0,11	109,143	0,1001	0,9143	-
E	3-15	0,10-0,11	109,182	0,1032	0,9182	-
F	4-5	0,10-0,11	108,988	0,1015	0,8988	-
G	6-5	0,10-0,11	109,225	0,1023	0,9225	-
H	6-8	0,09-0,10	108,861	0,0965	0,8861	-
I	7-8	0,09-0,10	108,858	0,0993	0,8858	-
J	8-9	0,09-0,10	108,899	0,0944	0,8899	-
K	9-10	0,10-0,11	109,021	0,1017	0,9021	-
L	9-55	0,10-0,11	109,368	0,1027	0,9368	-
M	11-13	0,10-0,11	109,359	0,1023	0,9359	-
N	12-10	0,10-0,11	109,326	0,1003	0,9326	-
O	12-13	0,10-0,11	110,327	0,1018	1,0327	-
P	14-15	0,10-0,11	109,646	0,1020	0,9646	-

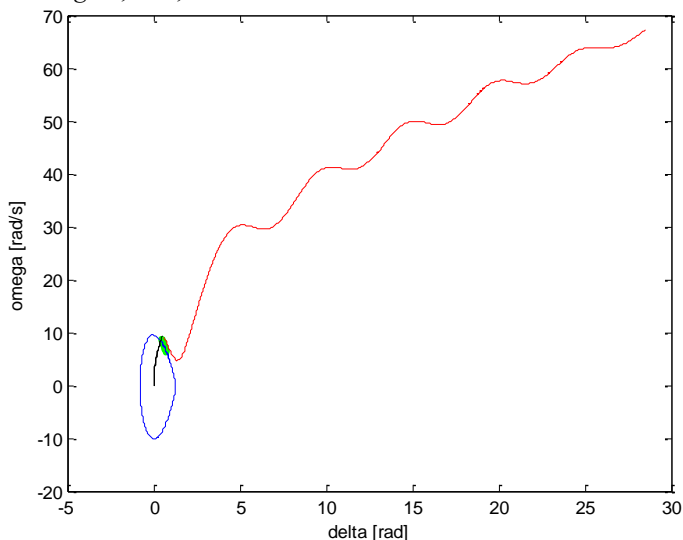
Pada tabel di atas ditampilkan perbandingan antara hasil simulasi dengan menggunakan metode konvensional yakni TDS dan dengan metode yang diusulkan. Metode simulasi numerik menghasilkan CCT dalam *range* nilai stabil dan tidak stabil sedangkan metode yang diusulkan menghasilkan nilai CCT secara langsung. Nilai CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan pada semua titik berada dalam *range* CCT metode TDS sehingga tidak terdapat *error* dan CCT dapat diterapkan. Sedangkan CPU *time* atau waktu simulasi metode simulasi

numerik diperoleh berdasarkan persamaan (4.2) dan untuk metode yang diusulkan diperoleh dari waktu waktu *running* program karena termasuk *direct method*.

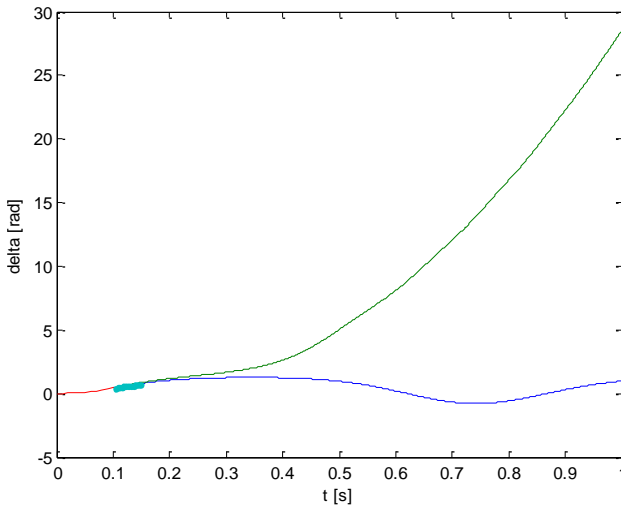
Pada grafik kecepatan sudut rotor terhadap sudut rotor yang ditampilkan terdapat tiga warna kurva yang digunakan yakni biru, merah dan hijau. Kurva warna biru menunjukkan kondisi stabil, warna merah menunjukkan kondisi tidak stabil dan warna hijau menunjukkan *critical trajectory*. Sedangkan pada grafik kecepatan sudut rotor terhadap waktu dan grafik sudut rotor terhadap waktu terdapat empat warna kurva yang digunakan yakni biru, merah, hijau dan cyan. Kurva biru menunjukkan kondisi stabil, kurva merah menunjukkan lintasan gangguan, kurva hijau menunjukkan kondisi tidak stabil, kurva cyan menunjukkan *critical trajectory*.

a. Titik gangguan B

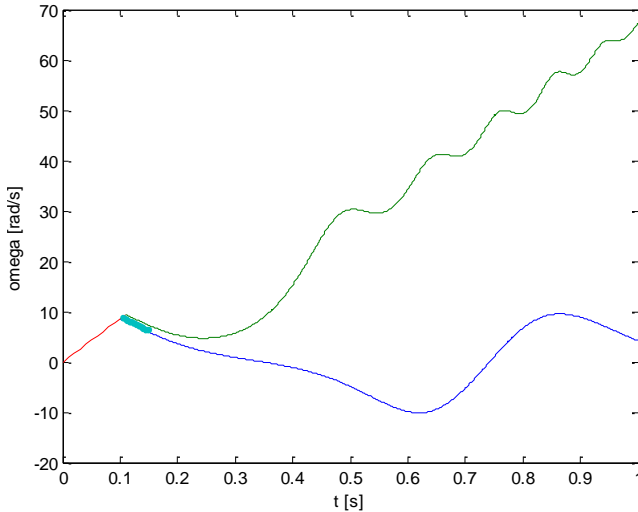
Saat gangguan di titik B yang terletak pada saluran antara bus 1-15 nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,1020 detik, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode simulasi numerik adalah dalam *range* 0,10-0,11 detik.



Gambar 4. 63 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 7 generator 57 bus tanpa *damper winding* bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan B



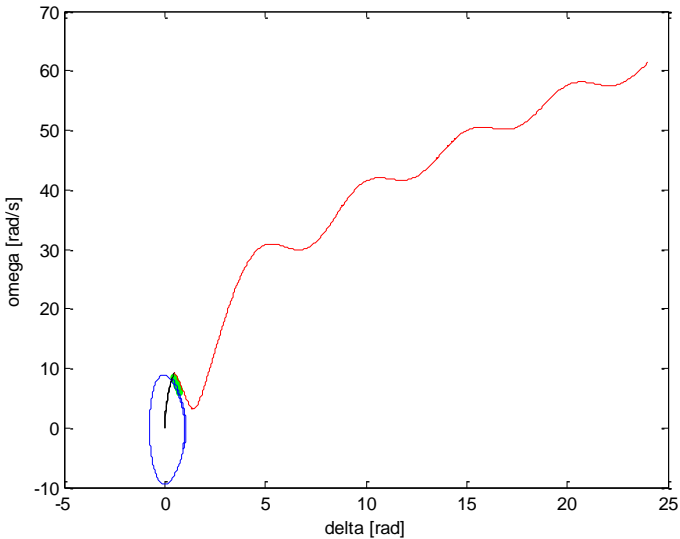
Gambar 4. 64 Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus tanpa *dampers winding* bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan B



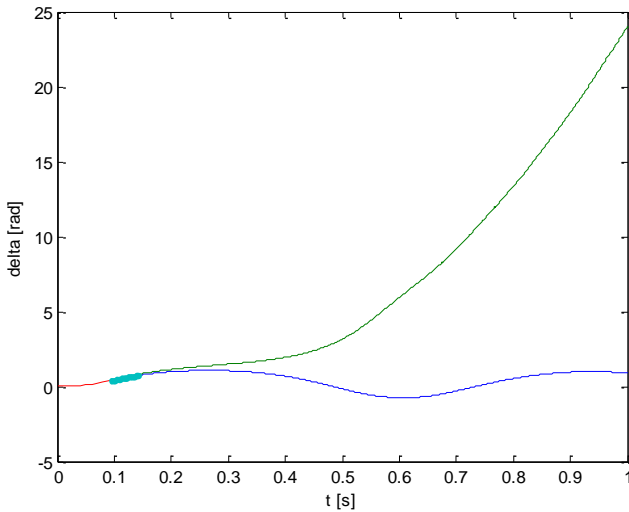
Gambar 4. 65 Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus tanpa *dampers winding* bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan B

b. Titik gangguan C

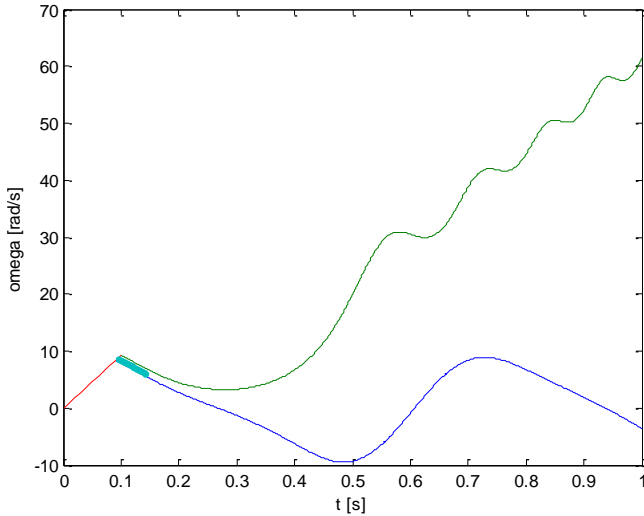
Saat gangguan di titik C yang terletak pada saluran antara bus 2-3 nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,0941 detik, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode simulasi numerik adalah dalam *range* 0,09-0,10 detik.



Gambar 4. 66 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 7 generator 57 bus tanpa *damper winding* bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan C



Gambar 4. 67 Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus tanpa *damper winding* bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan C



Gambar 4. 68 Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus tanpa *damper winding* bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan C

4.2.2.4 Gangguan fasa ke fasa (line to line)

Gangguan fasa ke fasa pada hasil simulasi yang ditunjukkan Tabel 4.20 terjadi pada fasa 1 ke fasa 2. Berdasarkan simulasi yang dilakukan diperoleh beberapa parameter antara lain CCT, lama iterasi serta *error*. Nilai *error* yang dipeoleh merupakan perbandingan metode yang diusulkan dengan metode *numerical simulation* atau yang lebih dikenal sebagai TDS (*Time Domain Simulation*).

Tabel 4. 20 Hasil perhitungan nilai CCT sistem 5 generator 57 bus tanpa *dampers* winding untuk gangguan *line to line*

Gangguan Antar Fasa (2LL)						
Fault Point	Open Line	Numerical Simulation		Metode yang Diusulkan		Error (%)
		CCT (s)	CPU (s)	CCT (s)	CPU (s)	
A	1-2	0,10-0,11	109,437	0,1022	0,9437	-
B	1-15	0,10-0,11	110,417	0,1018	1,0417	-
C	2-3	0,09-0,10	109,04	0,0976	0,904	-
D	3-4	0,10-0,11	109,429	0,1014	0,9429	-
E	3-15	0,10-0,11	109,535	0,1023	0,9535	-
F	4-5	0,10-0,11	108,974	0,1027	0,8974	-
G	6-5	0,10-0,11	109,146	0,1031	0,9146	-
H	6-8	0,09-0,10	110,381	0,0973	1,0381	-
I	7-8	0,09-0,10	109,322	0,0993	0,9322	-
J	8-9	0,09-0,10	108,908	0,0943	0,8908	-
K	9-10	0,10-0,11	109,284	0,1017	0,9284	-
L	9-55	0,10-0,11	109,914	0,1085	0,9914	-
M	11-13	0,10-0,11	109,152	0,1019	0,9152	-
N	12-10	0,10-0,11	109,91	0,1030	0,991	-
O	12-13	0,10-0,11	112,206	0,1037	1,2206	-
P	14-15	0,10-0,11	109,133	0,1020	0,9133	-

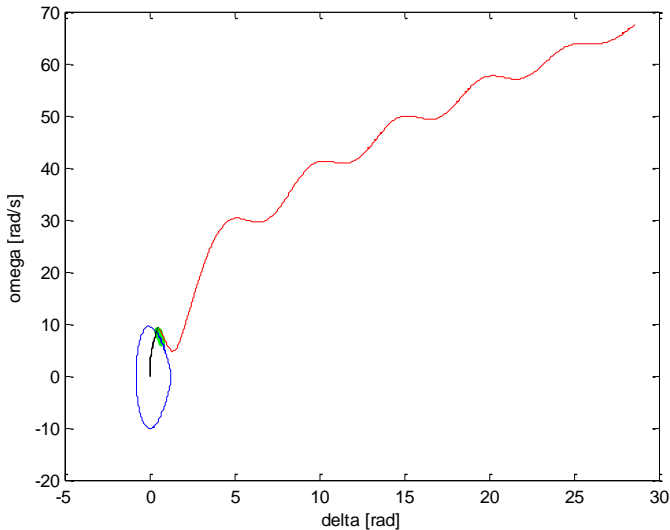
Hasil simulasi di atas dibandingkan antara nilai CCT antara metode yang diusulkan dengan metode simulasi numerik. Pada metode simulasi numerik hasil CCT yang diperoleh berupa rentang nilai antara kondisi stabil dan tidak stabil sedangkan pada metode yang diusulkan nilai CCT langsung diperoleh. Berdasarkan perbandingan metode yang diusulkan dengan metode simulasi numerik tidak terdapat *error* sehingga setting CCT. Waktu simulasi metode konvensional TDS lebih lama dikarenakan

metode ini dilakukan dengan cara *trial and error* sedangkan pada metode yang diusulkan jauh lebih cepat karena merupakan *direct method*.

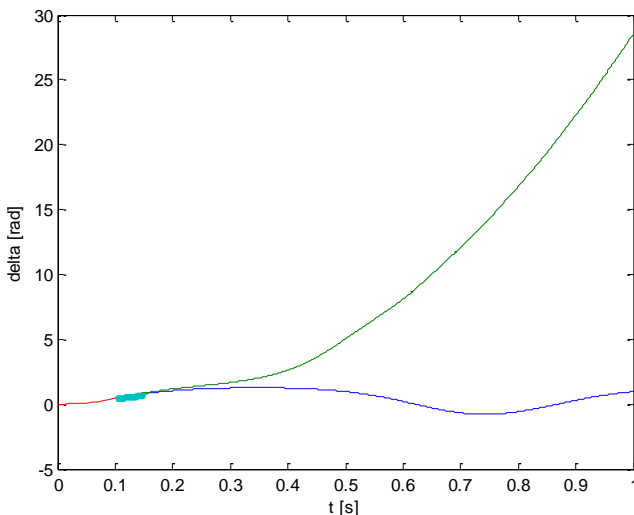
Berikut ini dilampirkan 3 grafik pada titik-titik gangguan seperti sub bab sebelumnya. Pada grafik kecepatan sudut rotor terhadap sudut rotor yang ditampilkan terdapat tiga warna kurva yang digunakan yakni biru, merah dan hijau. Kurva warna biru menunjukkan kondisi stabil, warna merah menunjukkan kondisi tidak stabil dan warna hijau menunjukkan *critical trajectory*. Sedangkan pada grafik kecepatan sudut rotor terhadap waktu dan grafik sudut rotor terhadap waktu terdapat empat warna kurva yang digunakan yakni biru, merah, hijau dan cyan. Kurva biru menunjukkan kondisi stabil, kurva merah menunjukkan lintasan gangguan, kurva hijau menunjukkan kondisi tidak stabil, kurva cyan menunjukkan *critical trajectory*.

a. Titik gangguan B

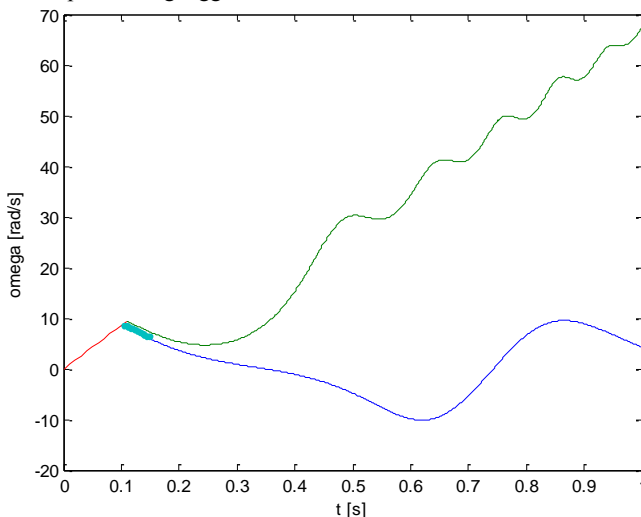
Saat gangguan di titik B yang terletak pada saluran antara bus 1-15 nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,1018 detik, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode simulasi numerik adalah dalam *range* 0,10-0,11 detik.



Gambar 4. 69 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 7 generator 57 bus tanpa *dampers winding* bila mengalami gangguan fasa ke fasa pada titik gangguan B



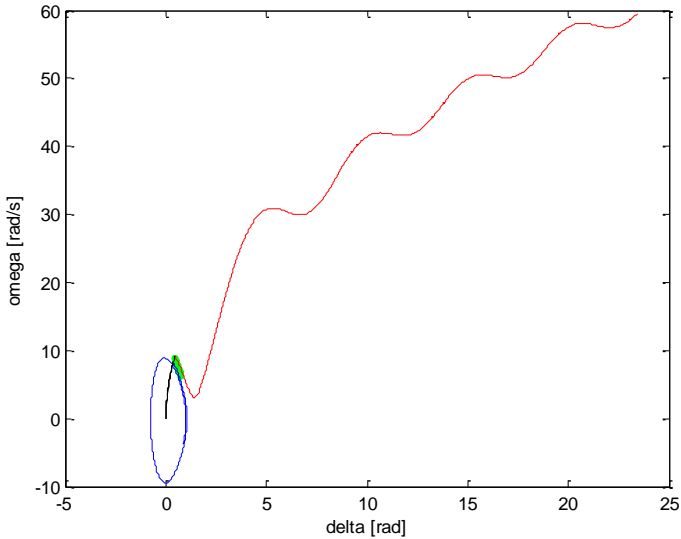
Gambar 4. 70 Grafik sudut rotor (δ) dalam rad terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus tanpa *damper winding* bila mengalami gangguan fasa ke fasa pada titik gangguan B



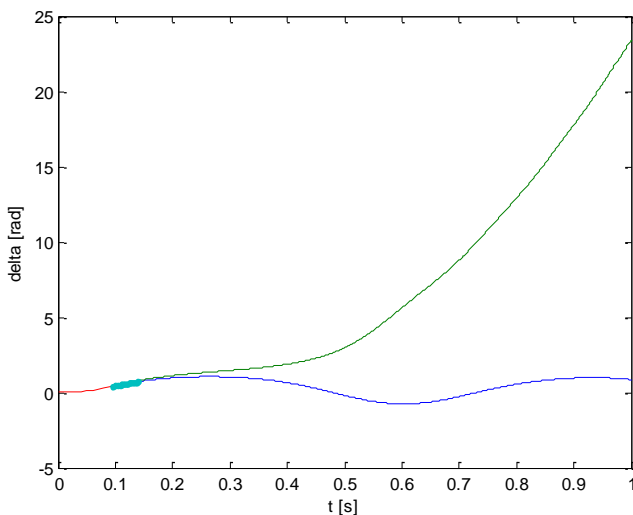
Gambar 4. 71 Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus tanpa *damper winding* bila mengalami gangguan fasa ke fasa pada titik gangguan B

b. Titik gangguan C

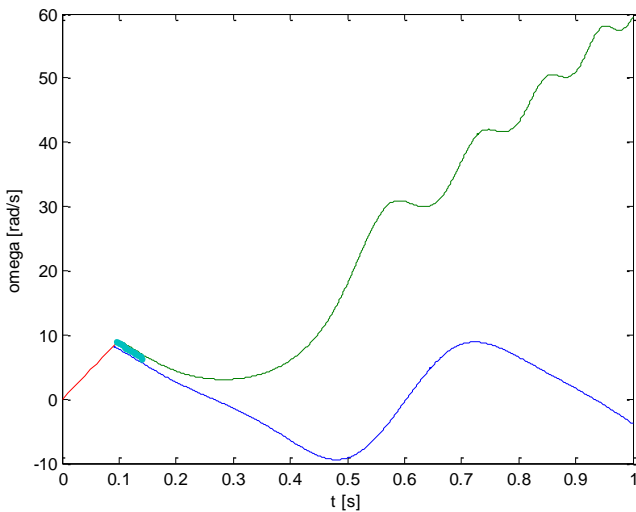
Saat gangguan di titik C yang terletak pada saluran antara bus 2-3 nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,0976 detik, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode simulasi numerik adalah dalam *range* 0,09-0,10 detik.



Gambar 4. 72 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 7 generator 57 bus tanpa *damper winding* bila mengalami gangguan fasa ke fasa pada titik gangguan C



Gambar 4. 73 Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus tanpa *dampner winding* bila mengalami gangguan fasa ke fasa pada titik gangguan C



Gambar 4. 74 Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus tanpa *dampner winding* bila mengalami gangguan fasa ke fasa pada titik gangguan C

4.2.3 Perhitungan CCT Sistem 7 generator 57 bus Menggunakan *Damper Winding*

Pada sub bab sebelumnya telah dilampirkan hasil simulasi sistem 7 generator 57 bus tanpa menggunakan *damper winding*. Oleh karena itu, untuk membandingkan perhitungan CCT metode yang diusulkan, pada sub bab ini dilampirkan hasil simulasi sistem 7 generator 57 bus dengan menggunakan *damper winding*. Besar nilai koefisien *damper winding* yang digunakan 0,05 p.u. Fungsi utama *damper winding* pada mesin sinkron adalah meredam osilasi mekanis sehingga meningkatkan kestabilan sistem. Hal ini ditunjukkan pada hasil simulasi yang menunjukkan nilai CCT pada sistem dengan menggunakan *damper winding* memiliki nilai yang lebih besar jika dibandingkan dengan sistem tanpa *damper winding*. Nilai CCT yang lebih besar menunjukkan bahwa waktu kritis untuk memutus gangguan dapat lebih lama dikarenakan sistem lebih stabil dibandingkan tanpa *damper winding* saat terkena gangguan transien.

4.2.3.1 Gangguan 1 fasa ke tanah

Gangguan satu fasa ke tanah pada hasil simulasi yang ditunjukkan Tabel 4.21 terjadi pada fasa ke-1. Berdasarkan simulasi yang dilakukan diperoleh beberapa parameter antara lain CCT, lama iterasi serta *error* pada kesembilan titik. Nilai *error* yang diperoleh merupakan perbandingan metode yang diusulkan dengan metode *numerical simulation* atau yang lebih dikenal sebagai TDS (*Time Domain Simulation*).

Tabel 4. 21 Hasil perhitungan nilai CCT sistem 7 generator 57 bus menggunakan *damper winding* untuk gangguan 1 fasa ke tanah

Gangguan 1 Fasa ke Tanah (1LG)						
Fault Line	Open Line	Numerical Simulation		Metode yang diusulkan		Error (%)
		CCT (s)	CPU (s)	CCT (s)	CPU (s)	
A	4-1	0,11-0,12	109,604	0,1151	0,9604	-
B	2-7	0,11-0,12	109,554	0,1121	0,9554	-
C	3-9	0,10-0,11	110,185	0,1014	1,0185	-
D	4-5	0,11-0,12	109,259	0,1153	0,9259	-
E	4-6	0,11-0,12	109,156	0,1150	0,9156	-
F	7-5	0,11-0,12	109,203	0,1117	0,9203	-
G	7-8	0,11-0,12	109,252	0,1120	0,9252	-
H	9-6	0,11-0,12	109,202	0,1152	0,9202	-
I	9-8	0,11-0,12	109,104	0,1111	0,9104	-

Lanjutan Tabel 4. 21 Hasil perhitungan nilai CCT sistem 7 generator 57 bus menggunakan *damper winding* untuk gangguan 1 fasa ke tanah

Fault Line	Open Line	Numerical Simulation		Metode yang diusulkan		Error (%)
		CCT (s)	CPU (s)	CCT (s)	CPU (s)	
J	13-12	0,10-0,11	109,896	0,1007	0,9896	-
K	9-10	0,11-0,12	109,454	0,1168	0,9454	-
L	9-55	0,11-0,12	109,85	0,1104	0,985	-
M	11-13	0,11-0,12	109,502	0,1152	0,9502	-
N	12-10	0,11-0,12	112,597	0,1151	1,2597	-
O	12-13	0,11-0,12	109,483	0,1173	0,9483	-
P	14-15	0,11-0,12	109,899	0,1136	0,9899	-

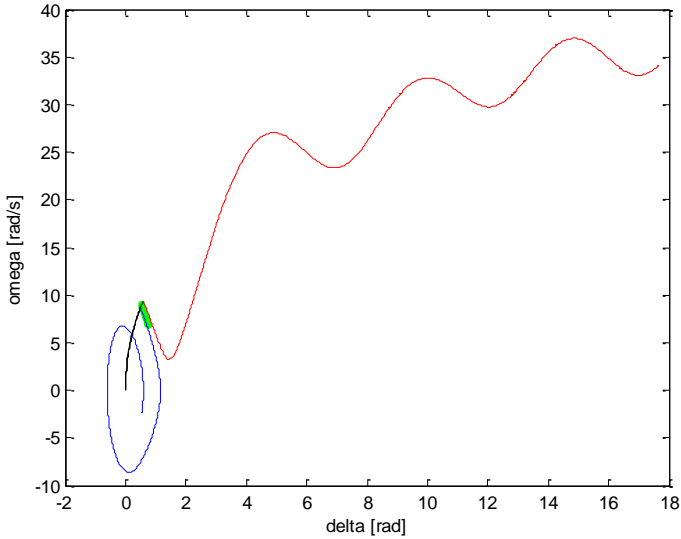
Hasil simulasi di atas dibandingkan antara nilai CCT antara metode yang diusulkan dengan metode simulasi numerik. Pada metode simulasi numerik hasil CCT yang diperoleh berupa rentang nilai antara kondisi stabil dan tidak stabil sedangkan pada metode yang diusulkan nilai CCT langsung diperoleh. Dengan demikian dapat dihitung prosentase kesalahan pada setiap titik gangguan. Berdasarkan hasil simulasi tidak terdapat *error* saat dibandingkan nilai CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan dengan metode simulasi numerik.

Dibandingkan dengan nilai CCT yang diperoleh pada sistem 7 generator 57 bus tanpa *damper winding* yakni sekitar 0.10-0.11, nilai CCT pada sistem dengan menggunakan *damper winding* bernilai lebih besar yakni sekitar 0.11-0.12 detik. Hal ini menunjukkan bahwa dengan penambahan *damper winding* menyebabkan sistem lebih stabil sehingga waktu pemutus kritis generator bernilai lebih besar. Nilai waktu pemutus yang lebih besar ini dikarenakan sistem lebih mampu menahan gangguan transien selama sekian detik akibat adanya kumparan peredam.

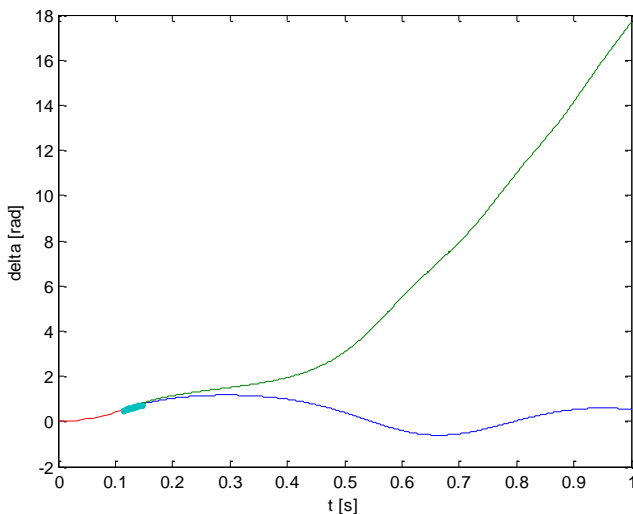
Berikut ini dilampirkan 3 grafik pada titik-titik gangguan seperti sub bab sebelumnya. Pada setiap grafik yang ditampilkan terdapat tiga warna kurva yang digunakan yakni biru, merah dan hijau. Kurva warna biru menunjukkan kondisi stabil saat gangguan dihilangkan sebelum CCT, warna merah menunjukkan kondisi tidak stabil saat gangguan dihilangkan setelah CCT dan warna hijau menunjukkan *critical trajectory* yang diperoleh dengan menggunakan metode yang diusulkan. Grafik yang ditampilkan adalah pada 2 titik gangguan A dan M yang dianggap mewakili keseluruhan titik.

a. Titik gangguan A

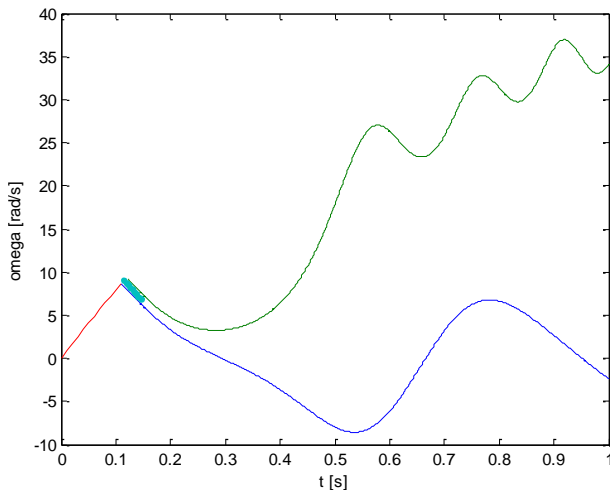
Saat gangguan di titik A yang terletak pada saluran antara bus 1-2 nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,1151 detik, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode simulasi numerik adalah dalam *range* 0,11-0,12 detik.



Gambar 4. 75 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan *damper winding* bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan A



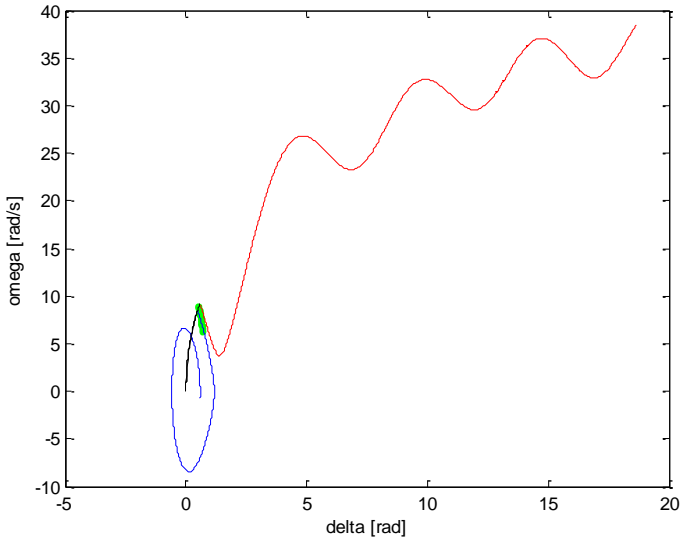
Gambar 4. 76 Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan *dampers winding* bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan A



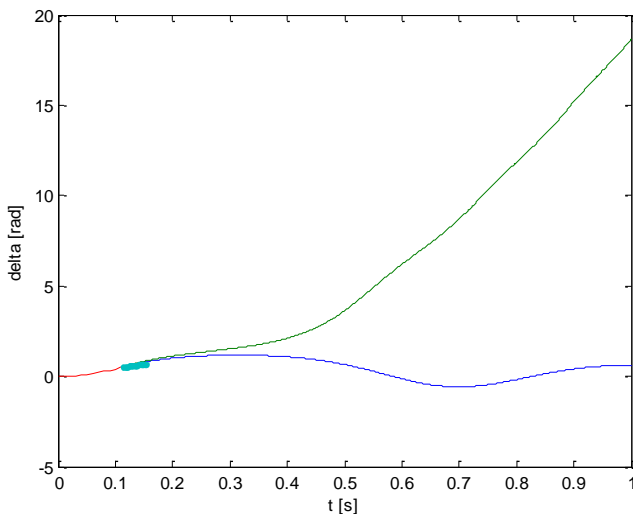
Gambar 4. 77 Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan *dampers winding* bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan A

b. Titik gangguan M

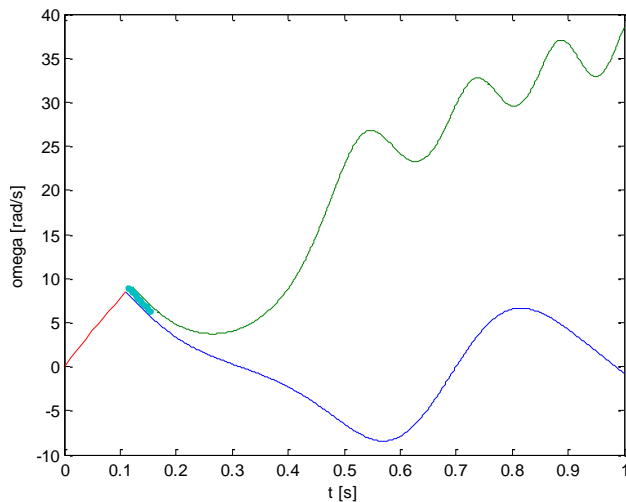
Saat gangguan di titik M yang terletak pada saluran antara bus 11-13 nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,1152 detik, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode simulasi numerik adalah dalam *range* 0,11-0,12 detik.



Gambar 4. 78 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan *damper winding* bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan M



Gambar 4. 79 Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (*t*) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan *dampner winding* bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan M



Gambar 4. 80 Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (*t*) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan *dampner winding* bila mengalami gangguan 1 fasa ke tanah pada titik gangguan M

4.2.3.2 Gangguan 2 fasa ke tanah

Gangguan dua fasa ke tanah pada hasil simulasi yang ditunjukkan Tabel 4.22 terjadi pada fasa 1 ke fasa 2. Berdasarkan simulasi yang dilakukan diperoleh beberapa parameter antara lain CCT, lama iterasi serta *error* pada kesembilan titik. Nilai *error* yang diperoleh merupakan perbandingan metode yang diusulkan dengan metode *numerical simulation* atau yang lebih dikenal sebagai TDS (*Time Domain Simulation*).

Tabel 4. 22 Hasil perhitungan nilai CCT sistem 7 generator 57 bus menggunakan *dampner winding* untuk gangguan 2 fasa ke tanah

Gangguan 2 Fasa ke Tanah (2LG)						
Fault Line	Open Line	Numerical Simulation		Metode yang Diusulkan		Error (%)
		CCT (s)	CPU (s)	CCT (s)	CPU (s)	
A	1-2	0.11-0.12	109.66	0.1118	0.966	-
B	1-15	0.11-0.12	109.674	0.1103	0.9674	-
C	2-3	0.10-0.11	109.306	0.1054	0.9306	-
D	3-4	0.11-0.12	109.216	0.1154	0.9216	-
E	3-15	0.11-0.12	112.04	0.1152	1.204	-
F	4-5	0.11-0.12	109.03	0.1127	0.903	-
G	6-5	0.11-0.12	109.124	0.1126	0.9124	-
H	6-8	0.11-0.12	109.067	0.1172	0.9067	-
I	7-8	0.11-0.12	109.549	0.1111	0.9549	-
J	8-9	0.10-0.11	109.367	0.1003	0.9367	-
K	9-10	0.11-0.12	109.144	0.1170	0.9144	-
L	9-55	0.11-0.12	110.942	0.1104	1.0942	-
M	11-13	0.11-0.12	109.061	0.1142	0.9061	-
N	12-10	0.11-0.12	109.813	0.1114	0.9813	-
O	12-13	0.11-0.12	109.605	0.1116	0.9605	-
P	14-15	0.11-0.12	109.969	0.1185	0.9969	-

Pada metode simulasi numerik hasil CCT yang diperoleh berupa rentang nilai antara kondisi stabil dan tidak stabil sedangkan pada metode yang diusulkan nilai CCT langsung diperoleh. Dengan demikian dapat dihitung prosentase kesalahan pada setiap titik gangguan. Berdasarkan hasil simulasi tidak terdapat *error* saat dibandingkan nilai CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan dengan metode simulasi numerik.

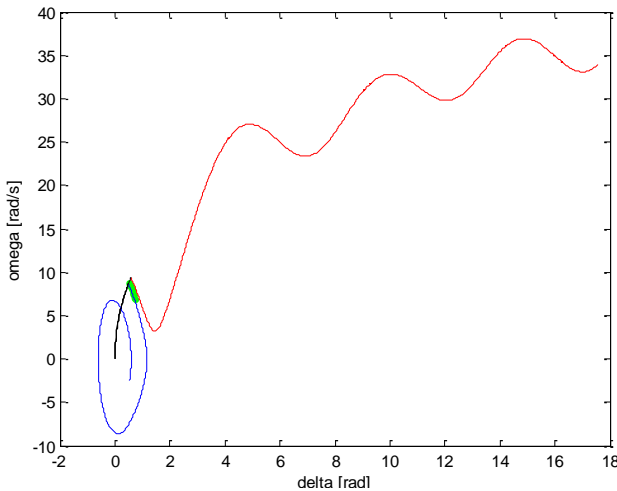
Dibandingkan dengan nilai CCT sistem tanpa *dampner winding* nilai CCT pada sistem dengan menggunakan *dampner winding* bernilai

lebih besar. Hal ini menunjukkan bahwa dengan penambahan *damper winding* menyebabkan sistem lebih stabil sehingga waktu pemutus kritis generator bernilai lebih besar. Nilai waktu pemutus yang lebih besar ini dikarenakan sistem lebih mampu menahan gangguan transien selama sekian detik akibat adanya kumparan peredam.

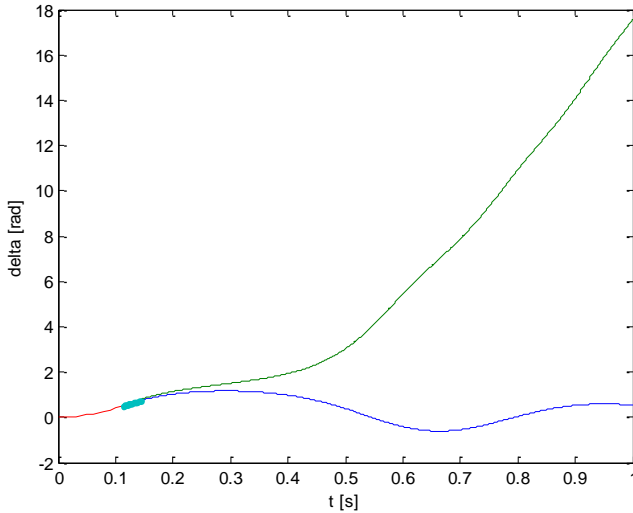
Grafik yang ditampilkan adalah pada 2 titik gangguan A dan M. Pada grafik kecepatan sudut rotor terhadap sudut rotor terdapat tiga warna kurva yakni biru, merah dan hijau. Kurva warna biru menunjukkan kondisi stabil, warna merah menunjukkan kondisi tidak stabil dan warna hijau menunjukkan *critical trajectory*. Sedangkan pada grafik kecepatan sudut rotor terhadap waktu dan grafik sudut rotor terhadap waktu terdapat empat warna kurva yakni biru, merah, hijau dan cyan. Kurva biru menunjukkan kondisi stabil, kurva merah menunjukkan lintasan gangguan, kurva hijau menunjukkan kondisi tidak stabil, kurva cyan menunjukkan *critical trajectory*.

a. Titik gangguan A

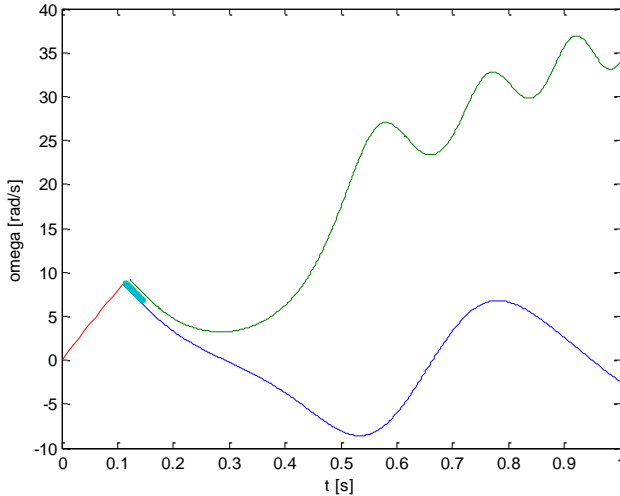
Saat gangguan di titik A yang terletak pada saluran antara bus 1-2 nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,1118 detik, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode simulasi numerik adalah dalam range 0,11-0,12 detik.



Gambar 4. 81 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan *damper winding* bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan A



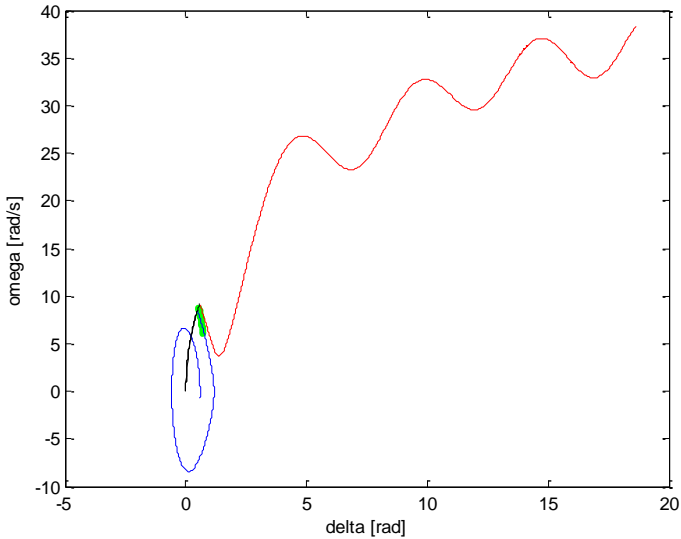
Gambar 4. 82 Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan *damper winding* bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan A



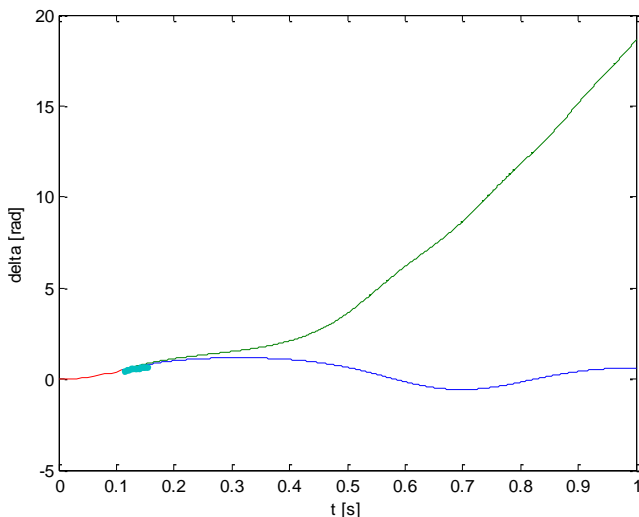
Gambar 4. 83 Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan *damper winding* bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan A

b. Titik gangguan M

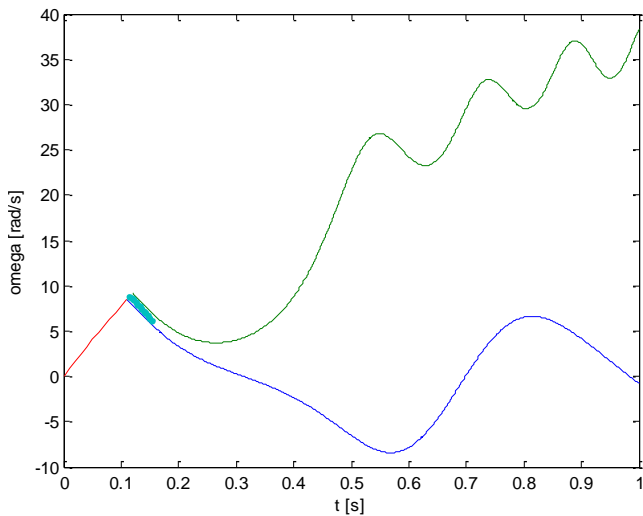
Saat gangguan di titik M yang terletak pada saluran antara bus 11-13 nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,1142 detik, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode simulasi numerik adalah dalam *range* 0,11-0,12 detik.



Gambar 4. 84 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan *damper winding* bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan M



Gambar 4. 85 Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan *dampner winding* bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan M



Gambar 4. 86 Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan *dampner winding* bila mengalami gangguan 2 fasa ke tanah pada titik gangguan M

4.2.3.3 Gangguan 3 fasa ke tanah

Gangguan tiga fasa ke tanah pada hasil simulasi yang ditunjukkan Tabel 4.23 terjadi pada ketiga fasa. Berdasarkan simulasi yang dilakukan diperoleh beberapa parameter antara lain CCT, lama iterasi serta *error*. Nilai *error* yang dipeoleh merupakan perbandingan metode yang diusulkan dengan metode *numerical simulation* atau yang lebih dikenal sebagai TDS (*Time Domain Simulation*).

Tabel 4. 23 Hasil perhitungan nilai CCT sistem 7 generator 57 bus menggunakan *dampers winding* untuk gangguan 3 fasa ke tanah

Gangguan 3 fasa ke tanah (3LG)						
Fault Line	Open Line	Numerical Simulation		Metode yang Diusulkan		Error (%)
		CCT (s)	CPU (s)	CCT (s)	CPU (s)	
A	1-2	0,11-0,12	109,512	0,1130	0,9512	-
B	1-15	0,11-0,12	109,308	0,1124	0,9308	-
C	2-3	0,10-0,11	109,554	0,1052	0,9554	-
D	3-4	0,11-0,12	109,06	0,1153	0,906	-
E	3-15	0,11-0,12	110,538	0,1151	1,0538	-
F	4-5	0,11-0,12	109,863	0,1124	0,9863	-
G	6-5	0,11-0,12	109,673	0,1124	0,9673	-
H	6-8	0,11-0,12	109,15	0,1170	0,915	-
I	7-8	0,11-0,12	109,53	0,1110	0,953	-
J	8-9	0,10-0,11	109,022	0,1025	0,9022	-
K	9-10	0,11-0,12	109,006	0,1168	0,9006	-
L	9-55	0,11-0,12	110,171	0,1104	1,0171	-
M	11-13	0,11-0,12	113,205	0,1135	1,3205	-
N	12-10	0,11-0,12	113,209	0,1117	1,3209	-
O	12-13	0,11-0,12	110,796	0,1165	1,0796	-
P	14-15	0,11-0,12	110,278	0,1185	1,0278	-

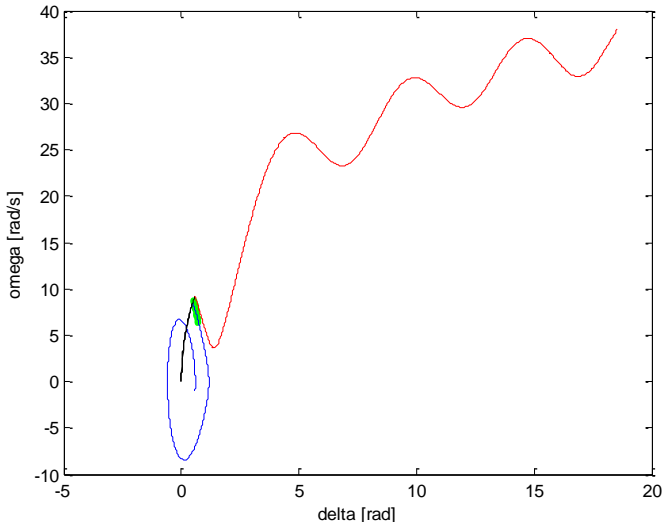
Pada metode simulasi numerik hasil CCT yang diperoleh berupa rentang nilai antara kondisi stabil dan tidak stabil sedangkan pada metode yang diusulkan nilai CCT langsung diperoleh. Perbandingan hasil CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan dengan metode simulasi numerik menunjukkan bahwa tidak terdapat *error* pada semua titik gangguan sehingga setting CCT aman untuk diterapkan. Dengan penambahan *dampers winding* menyebabkan sistem lebih stabil sehingga waktu pemutus kritis generator bernilai lebih besar. Nilai waktu pemutus

yang lebih besar ini dikarenakan sistem lebih mampu menahan gangguan transien selama sekian detik akibat adanya kumparan peredam.

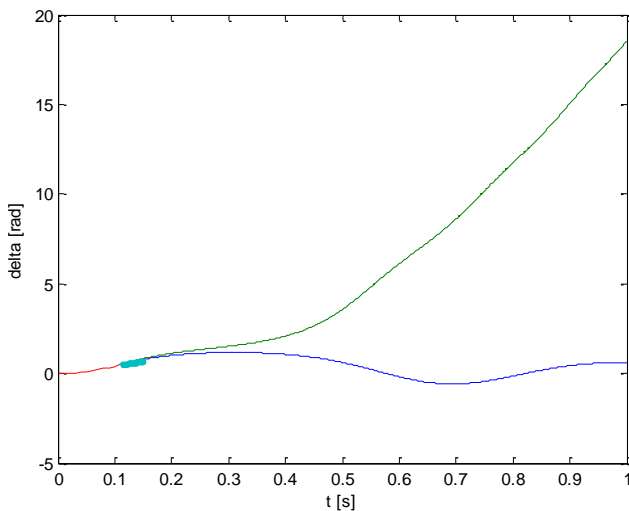
Pada grafik kecepatan sudut terhadap besar sudut rotor terdapat tiga warna kurva yang digunakan yakni biru, merah dan hijau. Kurva warna biru menunjukkan kondisi stabil yang ditunjukkan dengan osilasi pada SEP, warna merah menunjukkan kondisi tidak stabil yakni grafik semakin ke atas dan warna hijau menunjukkan *critical trajectory* yang diperoleh dengan menggunakan metode yang diusulkan. Sedangkan pada grafik kecepatan sudut terhadap waktu dan grafik sudut rotor terhadap waktu, kurva warna merah menunjukkan lintasan gangguan, warna biru untuk kondisi stabil yang ditunjukkan dengan osilasi di sekitar *steady state*, warna hijau untuk kondisi tidak stabil yang ditunjukkan dengan peningkatan kecepatan sudut dan sudut rotor secara terus menerus, serta kurva warna cyan menunjukkan *critical trajectory*.

a. Titik gangguan A

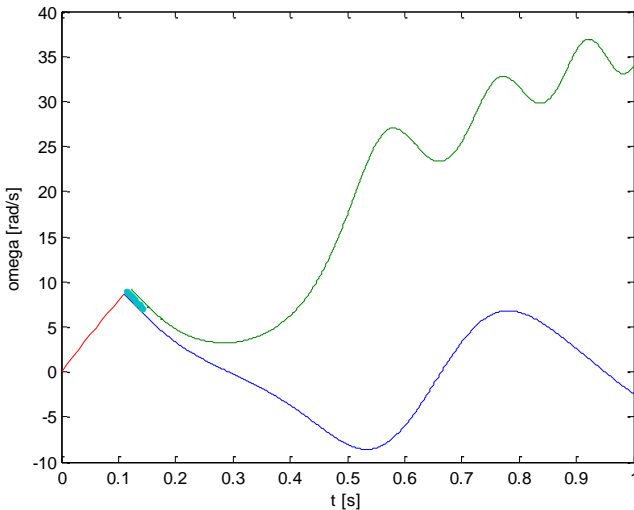
Saat gangguan di titik A yang terletak pada saluran antara bus 1-2 nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,1130 detik, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode simulasi numerik adalah dalam *range* 0,11-0,12 detik.



Gambar 4. 87 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan *dampers winding* bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan A



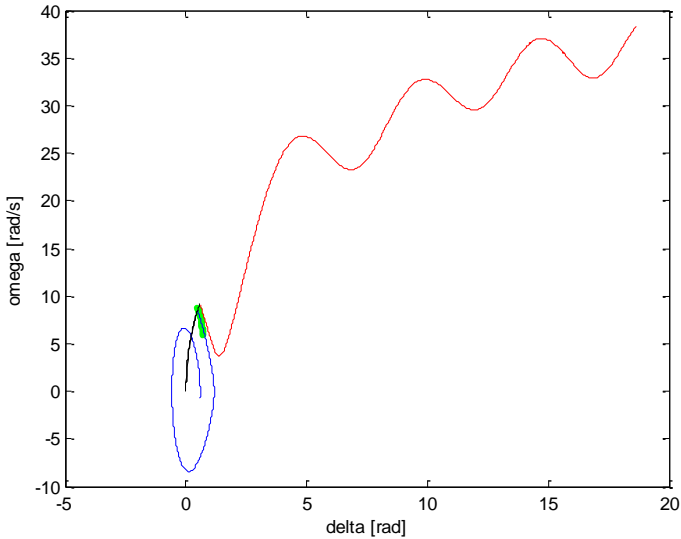
Gambar 4. 88 Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (*t*) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan *damper winding* bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan A



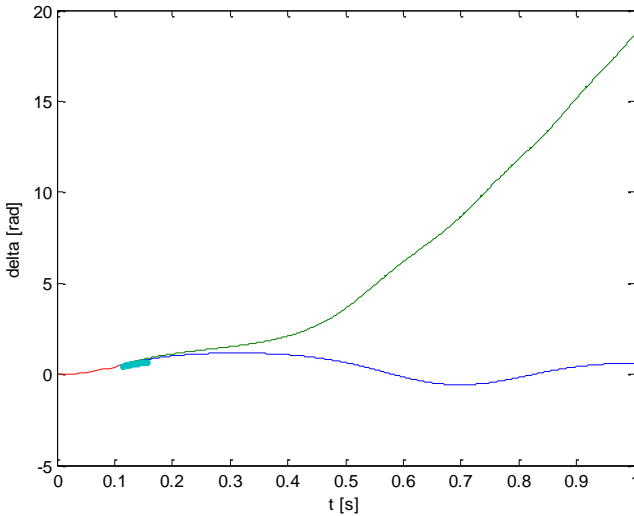
Gambar 4. 89 Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (*t*) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan *damper winding* bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan A

b. Titik gangguan M

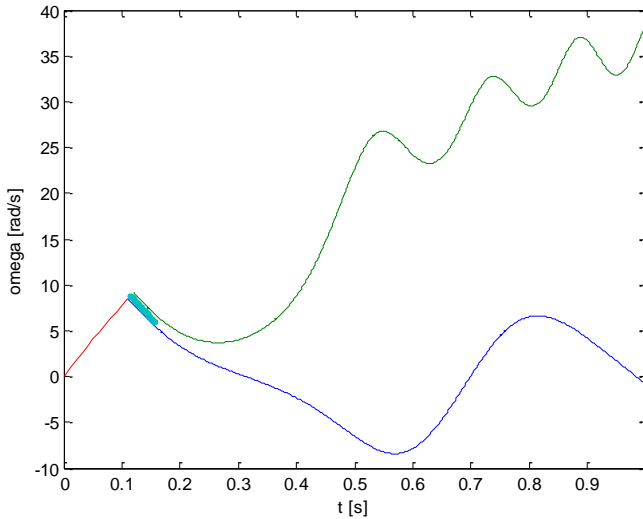
Saat gangguan di titik M yang terletak pada saluran antara bus 11-13 nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,1135 detik, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode simulasi numerik adalah dalam *range* 0,11-0,12 detik.



Gambar 4. 90 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan *damper winding* bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan M



Gambar 4. 91 Grafik sudut rotor (δ) dalam rad terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan *dampner winding* bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan M



Gambar 4. 92 Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan *dampner winding* bila mengalami gangguan 3 fasa ke tanah pada titik gangguan M

4.2.3.4 Gangguan fasa ke fasa (line to line)

Gangguan tiga fasa ke tanah pada hasil simulasi yang ditunjukkan Tabel 4.24 terjadi pada ketiga fasa. Berdasarkan simulasi yang dilakukan diperoleh beberapa parameter antara lain CCT, lama iterasi serta *error* pada kesembilan titik. Nilai *error* yang diperoleh merupakan perbandingan metode yang diusulkan dengan metode *numerical simulation* atau yang lebih dikenal sebagai TDS (*Time Domain Simulation*).

Tabel 4. 24 Hasil perhitungan nilai CCT sistem 7 generator 57 bus menggunakan *damper winding* untuk gangguan antar fasa (*line to line*)

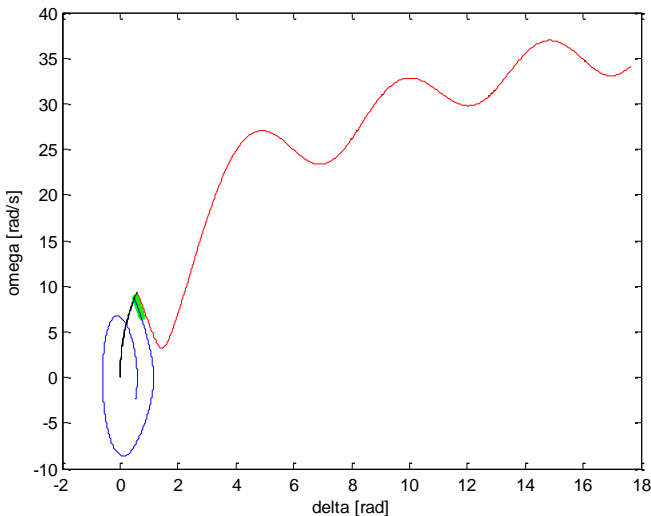
Gangguan Antar Fasa (2LL)						
Fault Line	Open Line	Numerical Simulation		Metode yang diusulkan		Error (%)
		CCT (s)	CPU (s)	CCT (s)	CPU (s)	
A	1-2	0,11-0,12	110,407	0,1116	1,0407	-
B	1-15	0,11-0,12	109,212	0,1127	0,9212	-
C	2-3	0,10-0,11	109,291	0,1014	0,9291	-
D	3-4	0,11-0,12	109,083	0,1153	0,9083	-
E	3-15	0,11-0,12	110,462	0,1150	1,0462	-
F	4-5	0,11-0,12	109,201	0,1118	0,9201	-
G	6-5	0,11-0,12	110,291	0,1121	1,0291	-
H	6-8	0,11-0,12	109,109	0,1155	0,9109	-
I	7-8	0,11-0,12	109,575	0,1111	0,9575	-
J	8-9	0,10-0,11	109,373	0,1010	0,9373	-
K	9-10	0,11-0,12	109,153	0,1168	0,9153	-
L	9-55	0,11-0,12	111,007	0,1104	1,1007	-
M	11-13	0,11-0,12	110,491	0,1150	1,0491	-
N	12-10	0,11-0,12	109,463	0,1117	0,9463	-
O	12-13	0,11-0,12	109,968	0,1172	0,9968	-
P	14-15	0,11-0,12	109,793	0,1185	0,9793	-

Perbandingan hasil CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan dengan metode simulasi numerik menunjukkan bahwa tidak terdapat *error* pada semua titik gangguan sehingga setting CCT aman untuk diterapkan. Dengan penambahan *damper winding* menyebabkan sistem lebih stabil sehingga waktu pemutus kritis generator bernilai lebih besar. Nilai waktu pemutus yang lebih besar ini dikarenakan sistem lebih mampu menahan gangguan transien selama sekian detik akibat adanya kumparan peredam.

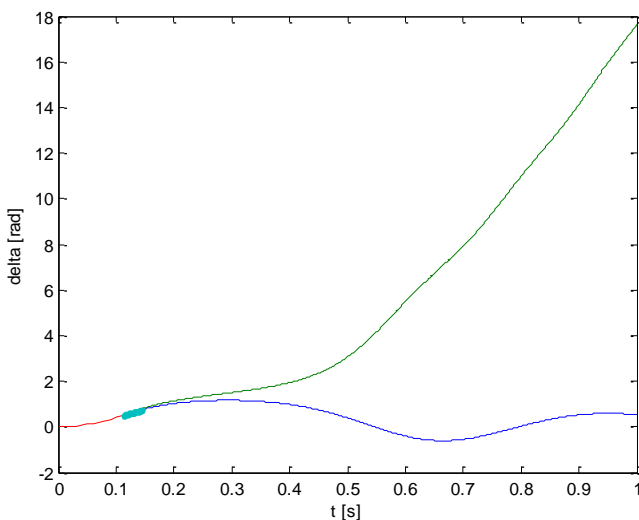
Berikut ini dilampirkan 3 grafik pada titik-titik gangguan seperti sub bab sebelumnya. Grafik yang ditampilkan adalah pada 2 titik gangguan D dan F yang dianggap mewakili keseluruhan titik. Pada grafik kecepatan sudut terhadap besar sudut rotor terdapat tiga warna kurva yang digunakan yakni biru, merah dan hijau. Kurva warna biru menunjukkan kondisi stabil yang ditunjukkan dengan osilasi pada SEP, warna merah menunjukkan kondisi tidak stabil yakni grafik semakin ke atas dan warna hijau menunjukkan *critical trajectory*. Sedangkan pada grafik kecepatan sudut terhadap waktu dan grafik sudut rotor terhadap waktu, kurva warna merah menunjukkan lintasan gangguan, warna biru untuk kondisi stabil yang ditunjukkan dengan osilasi di sekitar *steady state*, warna hijau untuk kondisi tidak stabil yang ditunjukkan dengan peningkatan kecepatan sudut dan sudut rotor secara terus menerus, serta kurva warna cyan menunjukkan *critical trajectory*.

a. Titik gangguan A

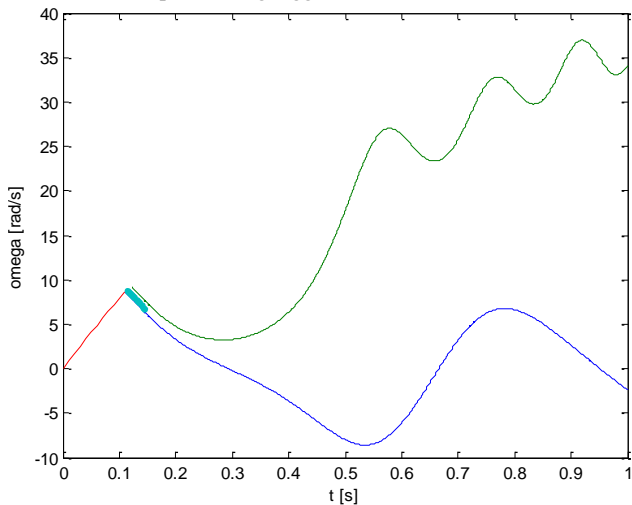
Saat gangguan di titik A yang terletak pada saluran antara bus 1-2 nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,1116 detik, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode simulasi numerik adalah dalam range 0,11-0,12 detik.



Gambar 4. 93 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan *dampner winding* bila mengalami gangguan fasa ke fasa pada titik gangguan A



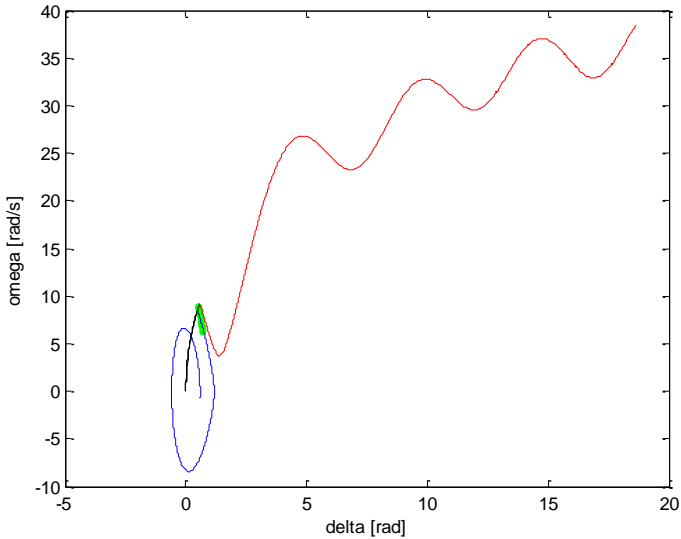
Gambar 4. 94 Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan *dampers winding* bila mengalami gangguan fasa ke fasa pada titik gangguan A



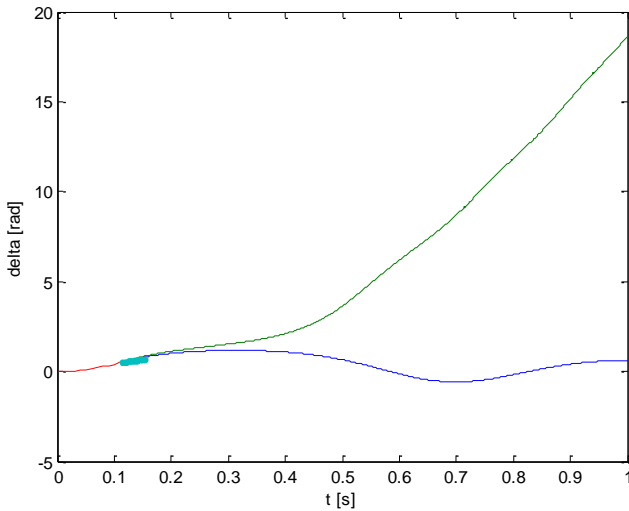
Gambar 4. 95 Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan *dampers winding* bila mengalami gangguan fasa ke fasa pada titik gangguan A

b. Titik gangguan M

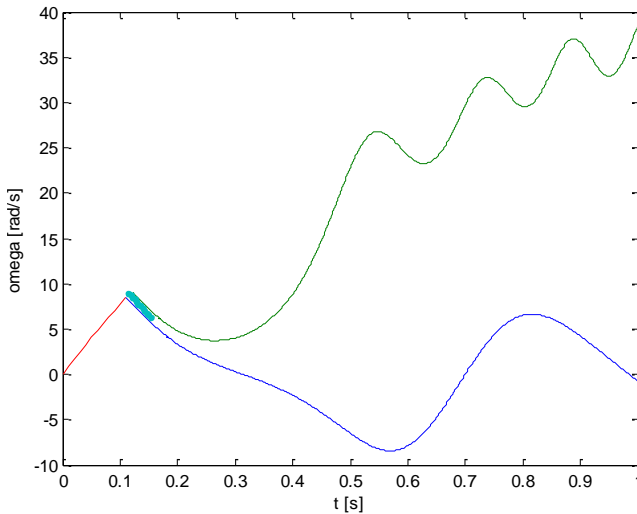
Saat gangguan di titik M yang terletak pada saluran antara bus 11-13 nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,1150 detik, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode simulasi numerik adalah dalam *range* 0,11-0,12 detik.



Gambar 4. 96 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan *dampers winding* bila mengalami gangguan fasa ke fasa pada titik gangguan M



Gambar 4. 97 Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan *dampers winding* bila mengalami gangguan fasa ke fasa pada titik gangguan M



Gambar 4. 98 Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (t) dalam detik pada sistem 7 generator 57 bus menggunakan *dampers winding* bila mengalami gangguan fasa ke fasa pada titik gangguan M

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, “*Definition and Classification of Power System Stability*,” IEEE Transaction on Power System, Vol.19, No.2, May. 2004.
- [2] Kundur, P, *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill, Inc, 1994.
- [3] Brilyan Muhammad, Dimas Anton Asfani, Ardyono Priyadi, Perhitungan CCT (*Critical Clearing Time*) Berdasarkan Trajectory Kritis Menggunakan Hilangnya Sinkronisasi pada Sistem 3 Generator 9 Bus yang Terhubung pada Infinite Bus, JURNAL TEKNIK POMITS Vol. 1, No. 1, (2013) 1-6, 2013
- [4] Yorino, Naoto, Ardyono Priyadi, Hironori Kakui, dan Mitsuhiro Takeshita. *A New Method for Obtaining Critical Clearing Time for Transient Stability*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 25, No. 3, August 2010.
- [5] Grainger, Jhon. J dan William D. Stevenson, JR, *Power System Analysis*. New York: McGraw-Hill, Inc,
- [6] Xuefeng Bai, T.Jiang, Z.Guo, Zheng Yan, Y.Ni, *A Unified Approach to Processing Unbalanced Conditions in Transient Sstability Calculations*. Proc. on Power Engineering Society General Meeting, Hong Kong, China. 2004.
- [7] J. Chapman, Stephen, *Electric Machinery Fundamentals Fourth Edition*, New York: McGraw-Hill, Inc, 2005.
- [8] J. Matsuki, T. Okada, C. Uenosono, *Loss of Synchronous Generator Described by Its Internal Flux and Force Distributions*, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 7, No.1, March 1992.
- [9] Athay T., R. Podmore, S. Virmani, *A Practical Method for the Direct Analysis of Transient Stability*, IEEE Transactions On Power System, Vol. PAS-98, No.2, March/April 1979
- [10] Das, J.C., *Transient in Electricl System, Analysis, Recognition, and Mitigation*, McGraw-Hill, Inc, 2010

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berikut ini beberapa kesimpulan yang diperoleh berdasarkan analisa hasil simulasi perhitungan CCT dengan metode hilangnya sinkronisasi pada sistem 3 generator 9 bus dan 7 generator 57 bus:

1. Perhitungan CCT dengan metode *critical trajectory* dengan *end point* hilangnya sinkronisasi menunjukkan hasil yang akurat jika dibandingkan dengan metode *numerical simulation* atau *Time Domain Simulation* (TDS). Hal ini didasarkan pada hasil simulasi tidak memiliki *error* (0%) baik pada sistem 3 generator 9 bus Fouad dan Anderson atau sistem 7 generator 57 bus IEEE.
2. Perhitungan CCT dengan metode *critical trajectory* menggunakan hilangnya sinkronisasi membutuhkan waktu yang lebih cepat jika dibandingkan dengan metode *numerical simulation*. Hal ini dikarenakan metode *critical trajectory* merupakan metode langsung sehingga waktu simulasi hanya berasal dari waktu *run* program sedangkan *numerical simulation* membutuhkan *trial and error*. Waktu rata-rata simulasi untuk sistem 3 generator 9 bus tanpa *damping* untuk metode *critical trajectory* adalah 1,3399 detik dan untuk metode *numerical simulation* adalah 113,3392 detik.
3. Penambahan *damping coefficient* pada sistem menyebabkan nilai CCT menjadi lebih besar. Hal ini dikarenakan dengan adanya *damping* menyebabkan osilasi mekanis akibat gangguan transien dapat diredam sehingga sistem lebih stabil dan waktu pemutus kritis generator menjadi lebih besar. Nilai waktu pemutus yang lebih besar ini dikarenakan sistem lebih mampu menahan gangguan transien selama sekian detik. Pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *damping* nilai CCT rata-rata berada dalam *range* 0,21-0,22 detik sedangkan dengan penambahan *damping* CCT rata-rata dalam *range* 0,24-0,26 detik. Begitu pula pada sistem 7 generator 57 bus tanpa *damping* nilai CCT rata-rata dalam *range* 0,10-0,11 detik sedangkan dengan penambahan *damping* CCT rata-rata dalam *range* 0,11-0,12 detik.
4. Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan CCT akibat gangguan asimetri dan gangguan simetri memiliki nilai yang kurang lebih sama.
5. Pemutusan gangguan yang dilakukan pemutus daya tidak lebih besar dari waktu pemutus kritis (CCT) sehingga kestabilan sistem terjamin.

5.2 Saran

Terdapat beberapa saran yang dapat diberikan untuk perbaikan dan pengembangan simulasi ini adalah sebagai berikut :

1. Perlu dilakukan simulasi pada sistem standart yang lebih kompleks untuk menguji keefektifan metode yang diusulkan.
2. Perlu dilakukan simulasi pada sistem kelistrikan industri sehingga metode *critical trajectory* ini dapat diaplikasikan pada dunia perindustrian.
3. Perlu dilakukan simulasi lebih lanjut dengan penambahan kontroler berupa AVR dan Governor serta pada sistem yang terhubung *infinite bus*.